

BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND



Prioritätsbescheinigung DE 103 09 711.2 über die Einreichung einer Patentanmeldung

Aktenzeichen: 103 09 711.2

Anmeldetag: 06. März 2003

Anmelder/Inhaber: ROBERT BOSCH GMBH, 70469 Stuttgart/DE

Bezeichnung: Verfahren zum Einätzen von Strukturen
in einem Ätzkörper mit einem Plasma

Zusatz: zu DE 101 45 297.7

IPC: H 01 L 21/3065, H 01 J 37/32, C 23 C 4/00

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der Teile der am 06. März 2003 eingereichten Unterlagen dieser Patentanmeldung unabhängig von gegebenenfalls durch das Kopierverfahren bedingten Farbabweichungen.

München, den 1. Juli 2010
Deutsches Patent- und Markenamt
Die Präsidentin
Im Auftrag

Verfahren zum Einätzen von Strukturen in einen Ätzkörper mit einem Plasma

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Einätzen von Strukturen in einen Ätzkörper, insbesondere von lateral exakt definierten Ausnehmungen in einen Siliziumkörper, mit einem Plasma, nach der Art der Anmeldung DE 101 45 297.7.

Stand der Technik

Ein bekanntes Problem beim Plasmaätzen, das aus elektrischer Aufladung resultiert, ist die Taschenbildung an einer als Ätzstopp dienenden dielektrischen Grenzfläche. Dieses "Notching-Phänomen" begrenzt die Aspektverhältnisse von Trenchgräben wie sie für mikromechanischen Strukturen benötigt werden, da die noch ohne Auftreten von "Notches" oder "Taschen" erlaubten Überätzzeiten mit wachsendem Aspektverhältnis (Verhältnis von Tiefe zu Breite) immer kleiner werden. Für einen fertigungssicheren Prozess werden daher derzeit, je nach Strukturgeometrie, als Limit des Aspektverhältnisses Werte von ca. 5:1 bis 10:1 angesehen, so dass beispielsweise Drehratensensoren nicht unter Verwendungen optimaler Schichtdicken von mehr als 20 μm sondern mit Epipolysiliziumschichten mit Dicken von ca. 10 μm bis 15 μm realisiert werden, was das Design und die Performance dieser Bauelemente stark limitiert.

Die Figur 1 illustriert die Ursache für das Auftreten von Taschenbildung. Während Elektronen im Wesentlichen ungerichtet auf eine zu ätzende Oberfläche oder Ättschicht 61 eines Substrates 19 einfallen und vor allen in den oberen Teilen von Trenchgräben mit hohem Aspektverhältnis von den Seitenwänden der geätzten Strukturen absorbiert werden, treffen positiv geladene Ionen gerichtet und nahezu senkrecht auf die Oberfläche 61 auf, so dass ein hoher Prozentsatz der Ionen den Boden des Trenchgrabens erreicht. Letztlich ist dieser gerichtete Ioneneinfall Ursache jeder an sich gewünschten Ätzanisotropie; andernfalls könnten keine senkrechten Wände geätzt werden. Solange der Ätzgrund beispielsweise noch aus Silizium besteht, hat das auch keine gravierenden Konsequenzen: Die vom oberen Teil der Seitenwand absorbierten Elektronen wandern im leitfähigen Silizium einfach nach unten zum Ätzgrund und neutralisieren dort die einfallenden positiv geladenen Ionen. Sobald jedoch eine dielektrische Grenzfläche 60 als Ätzstopp erreicht ist, kann dieser Ausgleichstrom die auf der dielektrischen Grenzfläche 60 fixierten ("getrappten") Ionen nicht mehr erreichen. Die Folge sind starke Felder zwischen Ätzgrund und Strukturseitenwänden, die nachfolgende Ionen vermehrt in den Übergangsbe-

reich Silizium-Dielektrikum hinein ablenken, was der Motor der nun einsetzenden Taschenbildung ist.

5 Zur Lösung dieses Problems wurde in DE 199 57 169 A1 bereits vorgeschlagen, durch eine Pulsung der Substratbiasspannung bzw. der der Substratelektrode zugeführten hoch- oder niederfrequenten Substratelektrodenleistung während Pulspausen dem Substrat Gelegenheit zur Entladung zu geben.

15 Durch die Pulsung der an die Substratelektrode angelegten Leistung bzw. Spannung wird ein intermittierender Ionenstrom erreicht und durch Entladevorgänge in den Strompausen dem Aufbau schädlicher Ladungen und daraus resultierender elektrischer Felder entgegengewirkt. Die Taschenunterdrückung wird grundsätzlich umso wirksamer, je länger die Pulspausen (= Entladezeiten) und gleichzeitig je kürzer die Pulsdauern (= Aufbau von Aufladungen) eingestellt sind, was jedoch die während der Pulsphasen für das Fort-

20 schreiten einer anisotropen Ätzung benötigten Impulsspitzenleistungen in die Höhe treibt. Dieser Ansatz der Zufuhr der für eine anisotrope Ätzung benötigten Ionenbeschleunigungsspannung an der Substratelektrode in immer kürzeren, dafür umso hochgespannten Pulsen führt zudem zu einem Verlust an Prozessstabilität, d.h. dem Auftreten von Ätzgrundrauhigkeit bis hin zur "Grasbildung" auf dem Ätzgrund. Dem kann zum Teil da-

25 durch entgegengewirkt werden, dass die Spannungs-Strom-Relation für die zugeführte Leistung an der Substratelektrode zugunsten einer höheren Spannung und eines geringeren Stroms eingestellt wird, wie dies im Fall von Niederfrequenzbiasing mit Frequenzen von beispielsweise 100 kHz bis 450 kHz erreicht werden kann. Dieses Vorgehen erweitert insbesondere das zulässige Prozessfenster in Richtung eines geringeren Puls-zu-

30 Periode-Verhältnisses, bevor es zum Auftreten von Ätzgrundrauhigkeiten kommt. Leider ist auch dieser Ansatz mit Nachteilen verbunden: Die Plasmaimpedanz ist sehr hoch, dem Anpassnetzwerk (Matchbox) werden hohe Kreisgüten abverlangt, um die benötigte Spannungstransformation zu leisten, das Matching selbst ist instabil und hochgradig von Details des Plasmas abhängig, und das generierte Ionenenergiespektrum zur Substratelektrode ist breit, was die Profilkontrolle von anisotrop geätzten Strukturen erschwert.

35 Zusammenfassend konnten die vorgenannten Nachteile durch die niederfrequente Pulsung einer hochfrequent modulierten Hochfrequenzleistung von beispielsweise 13,56 MHz gemäß DE 199 57 169 A1 und die damit verbundene Emulation einer Niederfrequenzbiasspannung von beispielsweise 100 kHz bis 450 kHz zwar in Grenzen gehalten

bzw. teilweise überwunden werden, jedoch ist die Unterdrückung einer Taschenbildung an einem dielektrischen Ätzstopp bei hohen Aspektverhältnissen von mehr als 10:1 immer noch beschränkt.

- 5 Aufgabe der vorliegenden Erfindung war, ausgehend von der unveröffentlichten Anmeldung DE 101 45 297.7, die Bereitstellung weiterer Verfahrensvarianten bzw. Ausführungsbeispiele zum Einätzen von Strukturen in einen Ätzkörper, die zu einer verbesserten Taschenstabilität insbesondere bei hohen Aspektverhältnissen der eingetätzten Strukturen führen, und die damit auch bei diesen Strukturen hohe Überätzzeiten erlauben.

Vorteile der Erfindung

- 15 Die vorliegende Erfindung beschreibt in Weiterführung von DE 101 45 297.7 neue Möglichkeiten zur Verfahrensführung mit dem Ziel der Unterdrückung von Problemen beim Plasmaätzen, insbesondere beim Plasmaätzen von Silizium, die aus elektrischer Aufladung resultieren. Dabei werden eine Reihe von problematischen Phänomenen, die das Plasmaätzen begleiten, eliminiert. Insbesondere wird die diesen Phänomenen zu Grunde liegende Ursache, nämlich die elektrische Aufladung, beseitigt.

- 20 So wurde als wesentlich erkannt, dass die begrenzte Wirkung einer Substratbiaspulsung daraus resultiert, dass in einem Plasma der Großteil der negativen Ladungsträger von Elektronen gebildet wird, während der Großteil der positiven Ladungsträger schwere, positiv geladene Ionen, sogenannte Kationen, sind. Negativ geladene Ionen, sogenannte Anionen, stellen in einem "normalen" Plasma nur einen geringen Anteil der geladenen
- 25 Teilchen. Da Kationen (und Anionen) ca. die 100000-fache Masse eines Elektrons besitzen und die Ladungsträgerbeweglichkeit mit der Masse skaliert, weist ein Plasma stets ein positives Plasmapotential von typischerweise 10 V bis 20 V gegenüber Oberflächen auf, die mit dem Plasma in Kontakt gebracht worden sind. Dieses Plasmapotential ist für negative Ladungsträger, also Elektronen und Anionen repulsiv, für Kationen attraktiv, so
- 30 dass Kationen stets auch bei ausgeschalteter Substratbiasspannung mit einer Mindestenergie von ca. 10 eV bis 20 eV das zu ätzende Substrat erreichen. Das zu ätzende Substrat ist gegenüber dem Plasma zudem stets negativ vorgespannt, so dass diese negative Vorspannung bei zusätzlich angelegter Substrateistung bzw. Substratbiasspannung aus den genannten Gründen noch weiter ins Negative gezogen wird, was zu einem an sich
- 35 gewünschten Auftreten einer sogenannten negativen "selfbias-Spannung" führt.

Somit können auch bei ausgeschalteter Beschleunigungsspannung nur gerichtete Ionen und ungerichtete Elektronen das Substrat erreichen, was die Wirksamkeit von Substratbi-aspulspausen gemäß DE 199 57 169 A1 zur Entladung von Strukturen begrenzt bzw. die für eine Entladung benötigten Pausenzeiten in unpraktikable Bereiche treibt.

Vorteilhaft ist weiterhin, dass sich das erfindungsgemäße Verfahren losgelöst vom konkret eingesetzten Ätzverfahren für eine Anzahl von Applikationen wie das Ätzen dielektrischer Schichten, das Öffnen von Ätzgrundpassivierungen ohne eine Schädigung einer Seitenwandpassivierung oder zum Einsatz bei Ätzprozessen auf Basis einer Chlor- oder Brom-Chemie unter Ausschaltung von Seitenwandangriffen und Maskenrandhinter-schneidungen eignet. Insbesondere kann es neben dem Einsatz bei einem Ätzverfahren für Silizium gemäß DE 42 41 045 C1 und dessen Weiterentwicklungen auch bei der Stru-kturierung von Siliziumdioxid oder anderen Dielektrika, dem Kontaktlochätzen bzw. der Erzeugung von Vias in SiO_2 oder anderen Dielektrika sowie einer Teflonpassivierung von Strukturseitenwänden eingesetzt werden.

Zeichnungen

Die Erfindung wird anhand der Zeichnungen und der nachfolgenden Beschreibung näher erläutert. Es zeigt Figur 1 eine Prinzipskizze zur Ursache der Taschenbildung, Figur 2 illustriert die Effekte, die beim Abschalten eines Plasma wie eines induktiv gekoppelten Plasmas oder eines Mikrowellenplasmas auftreten, Figur 3 zeigt eine Prinzipskizze für ein erstes Ausführungsbeispiel einer Plasmaätzanlage und deren Steuerung über eine gekoppelte Pulstechnik an Plasmaquelle und Substrat, Figur 4 zeigt ein zu Figur 3 alternatives zweites Ausführungsbeispiel mit Doppelpulstechnik an der Substratelektrode gemäß DE 199 57 169 A1, Figur 5 erläutert drei alternative Pulszüge zur Pulsung der Plasmaleistung und der Substratleistung gemäß Figur 3 oder Figur 4, Figur 6 zeigt ein drittes, zu Figur 3 oder Figur 4 alternatives Ausführungsbeispiel, Figur 7 zeigt den Aufbau der Pulszüge zur Pulsung der Plasmaleistung und der Substratspannung gemäß Figur 6, Figur 8 zeigt ein zu Figur 3, Figur 4 oder Figur 6 alternatives viertes Ausführungsbeispiel, Figur 9 zeigt den Aufbau der Pulszüge zur Pulsung der Plasmaleistung und der Substratspannung gemäß Figur 8, Figur 10 erläutert das Auftreten von Elektronenakkumulationen beim Plasmaätzen im oberen Teil eines mit einer Seitenwandpassivierung versehenen Trenchgrabens oder in der Nähe des Maskenrandes

sowie die Taschenbildung, Figur 11 beschreibt den Mechanismus der Schädigung einer Seitenwandpassivierung beim Öffnen einer Bodenpassivierung eines Trenchgrabens mit nachfolgender, lokal unerwünschter isotroper Seitenwandätzung mit ClF_3 , und Figur 12 zeigt, welche Konsequenzen elektrische Aufladungen beim Ätzen von Dielektrika haben können.

Ausführungsbeispiele

Zur Durchführung der nachfolgend erläuterten Ausführungsbeispiele wird zunächst von der Plasmaätzanlage ausgegangen, die bereits in DE 101 45 297.7 beschrieben ist. Insbesondere werden die dort verwendeten Bezugszeichen mit gleicher Bedeutung weiterhin verwendet, so dass auf eine erneute Erläuterung verzichtet werden kann.

Die Figur 2 zeigt die bei einem Abschalten eines Plasmas, insbesondere einem Abschalten eines gepulsten Plasmas, in der Pulspause auftretenden Effekte. Zunächst wird dabei das Plasma, ausgehend von einem "normalen" Plasma, das während der Pulsdauer aus einer niedrigen Dichte an Anionen und einer hohen Dichte an Elektronen und Kationen zusammengesetzt ist, zum Zeitpunkt t_0 vorübergehend abgeschaltet. In der damit beginnenden Pulspause kühlt das Elektronengas in dem Plasma innerhalb von einigen Mikrosekunden ab, wobei es teilweise zur Rekombination von Elektronen mit Kationen und zum paarweisen Verlust beider Spezies kommt, andererseits aber auch ein beträchtlicher Teil der Elektronen von neutralen Gasmolekülen eingefangen wird, wodurch sich Anionen bilden. Dieser Effekt wird unterstützt durch einen drastischen Anstieg des Einfangsquerschnitts von niederenergetischen Elektronen nach dem Abkühlen des Elektronengases sowie der Elektronegativität der beteiligten Gasmoleküle. Für bei einem Plasmaätzen von Silizium oder Siliziumoxid übliche Prozessgase wie SF_6 , Cl_2 , HCl , HBr , SiCl_4 , SiF_4 , C_4F_8 , C_3F_6 , C_4F_6 , C_5F_8 , CF_4 , CHF_3 , C_2F_6 , C_3F_8 , O_2 , N_2 ist die Elektronegativität hoch, d.h. die Tendenz zur Anionenbildung bei Vorliegen ausreichend niederenergetischer, "kalter" Elektronen entsprechend ausgeprägt. Wenige μs nach dem Abschalten der Plasmaanregung liegt daher bereits ein Plasma vor, das fast nur noch Anionen und Kationen und nur noch sehr wenige freie Elektronen enthält. Dieser Zustand ist dann relativ langlebig, d.h. Anionen- und Kationenkonzentration fallen durch Stoßneutralisation über der Zeit t exponentiell mit einer Zeitkonstante, die je nach Druck und beteiligten Gassorten einige $10 \mu\text{s}$ bis einige $100 \mu\text{s}$ betragen kann, gegen 0 ab

Die Formel im unteren Teil von Figur 2 gibt die Polarität P des Plasmas wieder, d.h. die normierte Asymmetrie der Massen positiver und negativer Ladungsträger. Für ein "normales" Plasma ist die Polarität zunächst nahe 1, da die Elektronenmassen m_e gegenüber den Kationenmassen m_{X+} nicht ins Gewicht fallen, und die Anionenkonzentration n_X nur sehr klein ist. Beim Abschalten des Plasmas fällt die Polarität P des Plasmas dagegen sehr schnell gegen 0, d.h. es liegt Ambipolarität vor.

Als wesentliche Konsequenz der näherungsweisen Massengleichheit von positiven und negativen Ladungsträgern im ambipolaren Plasma sinkt auch das Plasmapotential U_{Plasma} auf 0, d.h. der Zeitverlauf der Polarität P entspricht in der Tendenz auch dem skizzierten zeitlichen Verlauf des Plasmapotentials U_{Plasma} , das ausgehend von ca. 10 V bis 20 V innerhalb weniger Mikrosekunden auf einen Wert nahe 0 V abfällt.

Die Konsequenzen aus diesem ambipolaren Zustand sind gravierend: Ohne eine angelegte Substratspannung, d.h. bei Fehlen einer Substratbiasleistung, besteht kein Potentialunterschied mehr zwischen Plasma und Substrat, so dass Kationen wie Anionen mit sehr geringen Energien auf das Substrat einwirken und dieses überall dort entladen können, wo immer sich schädliche Ladungsagglomerationen befinden.

Von dieser Erkenntnis machen die hier erläuterten Ausführungsbeispiele mit einer gepulsten Plasmaleistung und Substratbiasleistung gemäß DE 101 45 297.7 Gebrauch.

Im Übrigen werden die nachfolgenden Ausführungsbeispiele bevorzugt zur Durchführung des Verfahrens gemäß DE 42 41 045 C1 beim anisotropen Ätzen von Silizium eingesetzt.

Die Figur 3 zeigt eine induktiv gekoppelte Plasmaquelle 5 entsprechend Figur 1 in DE 101 45 297.7 mit einem Plasmagenerator 13, der bevorzugt bei einer Frequenz von 13,56 MHz betrieben wird, zur Speisung einer induktiven Spule 11, sowie einen Hochfrequenz- oder Niederfrequenzgenerator als Substratleistungsgenerator 22, der bevorzugt bei einer Frequenz 13,56 MHz bzw. 380 kHz betrieben wird, zur Speisung der Substratelektrode 18. Sowohl der Substratleistungsgenerator 22 als auch der Plasmagenerator 13 sind jeweils mit einem Pulsgeber 62, 63, vorzugsweise einem Niederfrequenzpulsgeber, verbunden oder versehen, um damit die Leistung des jeweils zugeordneten Generators 13, 22 mit einer Frequenz von vorzugsweise 200 Hz im Fall des Substratleistungsgenerators

22 bzw. 1,2 kHz im Fall des Plasmagenerators 13 und einem Duty-Cycle von vorzugsweise jeweils 50 % zu pulsen. Eine optionale Synchronisation beider Pulsgeber 62, 63 bzw. beider Generatoren 13, 22 gestattet es zudem, eine feste, ganzzahlige Phasenbeziehung zwischen dem in die Substratelektrode 18 und dem in die Spule 11 eingekoppelten Pulszug einzustellen, so dass ein "stehendes" Bild der beiden Pulszüge zueinander entsteht.

Die Figur 4 zeigt in Weiterführung von Figur 3 eine besonders vorteilhafte Ausführungsform, wobei der Substratbiasgenerator 22 gegenüber Figur 3 neben der niederfrequenten Modulation mit dem Pulsgeber 62 zusätzlich durch einen weiteren Pulsgeber 64 mit einer bevorzugten Frequenz von 100 kHz und geringerem Duty-Cycle von vorzugsweise 10 % gepulst wird. Auch hier kann eine Synchronisationseinheit vorgesehen sein, um zwischen dem in die Substratelektrode 18 und dem in die Spule 11 eingekoppelten Pulszug eine feste, ganzzahlige Phasenbeziehung einzustellen, so dass erneut ein "stehendes" Bild der beiden Pulszüge zueinander entsteht.

Die Figur 5 zeigt verschiedene bevorzugte Varianten der Pulsung der Einhüllenden des Trägersignals 34 von Plasmagenerator und Substratbiasgenerator 13, 22 für die Anordnungen gemäß Figur 3 oder Figur 4 ohne Rücksicht darauf, ob es sich bei der Substratspannung um ein hochfrequentes Trägersignal, beispielsweise ein mit 100 kHz gepulstes hochfrequentes Trägersignal, oder um ein niederfrequentes Trägersignal, beispielsweise mit einer Frequenz von 100 kHz bis 450 kHz, handelt. Wesentlich ist jedoch in Figur 5, dass während der relativ langsamen Pulsphasen an der Substratelektrode mehrere Plasmapulspulse und Plasmapausen auftreten, wobei während letzterer das Plasma ambipolar wird und der Abbau von Aufladungen auf dem Wafer mit hoher Effizienz erfolgt.

Im oberen Teil von Figur 5 wird die Plasmaleistung bzw. der Plasmagenerator 13 beispielhaft mit einer Frequenz von 1,15 kHz und 50 % Duty-Cycle gepulst, während der Substratbias bzw. der Substrateistungsgenerator 22 beispielhaft mit 200 Hz und 50 % Duty-Cycle gepulst wird.

Im Laufe von Versuchen hat sich gezeigt, dass für eine wirksame Taschenunterdrückung die Plasmapulsrate eine Frequenz von mindestens 500 Hz, vorzugsweise 1000 Hz, noch besser eine Frequenz in einem Bereich von 1 kHz bis 10 kHz, beispielsweise 2000 Hz bis 3000 Hz aufweisen sollte. Noch höhere Frequenzen führen zu Problemen mit dem ver-

mehrten Auftreten von "Zündaussetzern", d.h. Plasmapulspausen, in denen es zu keiner Zündung des Plasmas kommt, mit entsprechend hoher reflektierter Leistung. Eine Plasmapulsrate von 250 Hz führte in Versuchen noch zur Taschenbildung, während bei 1000 Hz stets keine Taschen mehr beobachtet wurden.

5

Frequenzen oberhalb von einigen kHz sind mit vertretbarer reflektierter Leistung nur dadurch zu realisieren, dass das Plasmadarf während der Plasmapulspausen nicht völlig erlischt, sondern mit geringer oder minimaler Intensität weiterbrennt, wie dies in DE 101 45 297.7 bereits ausgeführt ist. Eine damit verbundene Grundionisation im Plasma kann beispielsweise erreicht werden, indem die Leistung in den Pulspausen nicht völlig auf 0 zurückgefahren wird, oder mit Zusatzmitteln in der Plasmaätzanlage 5 für eine Grundionisation wie einen Hilfsgenerator geringer Leistung oder eine hochgespannte DC-Einkopplung. Für die Substratelektrodenpulsung ist im Übrigen zu beachten, dass gängige, preiswerte Substratbiasgeneratoren 22 meist nur mit maximal ca. 300 Hz bis 500 Hz gepulst werden können.

15

Die Darstellung im oberen Teil von Figur 5 weist keine Ganzzahlbeziehung zwischen den beiden Pulsfrequenzen auf; das Verhältnis der beiden Frequenzen liegt bei ca. 6. Auf diese Weise kommt es zu einer Schwebung mit einer Schwebungsfrequenz von etwa 50 Hz.

20

Für die gezeigte Verfahrensführung mit einer Nicht-Ganzzahlbeziehung der Frequenzen ist es vorteilhaft, wenn deren Verhältnis in der Nähe einer geraden Zahl, vorzugsweise mindestens 4, liegt, damit während einer Substratbiaspause stets mindestens eine fallende Plasmapulspanke sowie daneben mindestens zwei Plasmapulspulse und zwei Plasmapulspausen pro Substratbiaspause und Substratbiaspuls auftreten. Besonders bevorzugt liegt die Plasmapulsfrequenz etwas oberhalb einer geradzahligen Beziehung der beiden Frequenzen, wobei diese Zahl erneut mindestens 4 betragen sollte, damit während einer Substratbiaspause stets mindestens zwei fallende Plasmapulspanken auftreten.

25

Im oberen Teil von Figur 5 sollte daher die Plasmapulsfrequenz bevorzugt statt wie gezeichnet 1,15 kHz zu 1,25 kHz gewählt werden, also etwas oberhalb einer 6:1-Relation. In diesem Fall treten unabhängig von der Phasenlage zwischen Substratpulsung und Plasmapulspulsung in den Substratbiaspausen stets mindestens drei fallende Plasmapulspanken auf.

35

Wird in Figur 5 exakt eine Ganzzahlbeziehung zwischen beiden Pulsfrequenzen gewählt, bietet sich die Möglichkeit einer Synchronisation der Pulsgeber 62, 63 gemäß Figur 3 oder Figur 4 an. Dies kann beispielsweise dadurch geschehen, dass der Plasmapulsgenerator 13 frei läuft, dessen Pulsverlauf geeignet abgegriffen wird, beispielsweise durch einen angekoppelten HF-Demodulator oder ein herausgeführtes Pulssignal, und der Pulsgeber 62 für den Substratleistungsgenerator 22 gemäß Figur 3 auf einem ganzzahligen Bruchteil dieser Frequenz phasenstarr mit dem abgegriffenen Plasmapulssignal verriegelt wird. Bevorzugt erfolgt dies über einen phase-locked-loop-Kreis (PLL), über den der Pulsgeber 62 des Substratleistungsgenerators 22 auf einem Bruchteil der Plasmageneratordfrequenz in einer festen Phasenbeziehung gehalten werden kann, oder durch eine übliche Synchronisationsschaltung. Alternativ ist es auch möglich, die Plasmapulsfrequenz über einen digitalen Teiler zu führen und so ein Signal mit einem Bruchteil der Plasmapulsfrequenz zu erzeugen. Digitale Teiler erlauben es besonders einfach, Frequenzbeziehungen herzustellen, die einer Zweierpotenz entsprechen; mit programmierbaren Teilern ist jedoch auch jede andere, vorzugsweise geradzahlige Teilerbeziehung möglich. Schließlich ist es möglich, den Substratleistungsgenerator 22 zunächst mit einer niedrigen Frequenz zu pulsen, und sich eine n-fache Frequenz für die Pulsung des Plasmagenerators 13 daraus abzuleiten. Auch hierfür eignet sich ein Phase-Locked-Loop-Kreis (PLL) oder jede andere Technik zur Frequenzvervielfachung.

Im mittleren Teil der Figur 5 ist eine 6:1-Frequenzrelation dargestellt, wobei der Plasmagenerator 13 mit 1,2 kHz und der Substratbiasgenerator 22 mit 200 Hz gepulst werden. Die Phasen beider Pulsgeber sind zueinander so synchronisiert, dass während der Substratbiaspausen jeweils exakt drei fallende Plasmapulssflanken auftreten.

Im unteren Teil der Figur 5 ist eine 4:1-Frequenzrelation zwischen Plasmapulsggeber 63 und Substratbiaspulsggeber 62 dargestellt. Die Phasen beider Pulsgeber 62, 63 sind dabei so verriegelt, dass während der Substratbiaspulspausen exakt zwei fallende Plasmapulssflanken auftreten. Durch die Phasensynchronisation beider Pulsgeber 62, 63 tritt hier keine Schwebung auf; vielmehr ist die Zahl der fallenden Plasmapulssflanken während der Substratbiaspausen jetzt eine feste Größe. Dies erlaubt auch einen Betrieb mit einer Frequenzrelation von 2:1 und mit mindestens einer fallenden Plasmapulssflanke während der Substratbiaspause zu einem wohldefinierten Zeitpunkt.

Die in Figur 5 erläuterten Pulstechniken sind vor allem geeignet für einen Substratleistungsgenerator 22, der in seiner oberen Grenzfrequenz auf beispielsweise 300 Hz, also auf relativ niedrige Pulsfrequenzen, beschränkt ist. Dies ist für die meisten einfachen und kostengünstigen Generatoren geringer Leistung der Fall. Insofern muss bei diesen Beispielen nur der Plasmagenerator 13 in der Lage sein, hohe Pulsfrequenzen von 1000 Hz und mehr zu verarbeiten.

Andererseits bieten teurere Generatoren großer Leistung, d.h. beispielsweise 5500 Watt, die im Allgemeinen auch elektronisch wesentlich aufwändiger gebaut sind, vielfach die Möglichkeit einer schnellen Pulsung ohne erhebliche Zusatzkosten.

Ein Vorteil der schnellen Pulsung liegt darin, dass sich während der relativ langsamen Substratbiaspausen Plasmapulse mehrfach wiederholen. Da weiter gemäß Figur 2 bei jeder fallenden Plasmapulsflanke eine große Anionenkonzentration erzeugt wird, wiederholt sich so während der Substratbiaspause mehrfach ein ambipolarer Zustand im Plasma, der eine hocheffiziente Entladung von Ladungsagglomerationen auf dem Substrat gestattet.

Als nachteilig ist demgegenüber anzusehen, dass solche Plasmapausen auch zu Zeiten auftreten, während der der Substratbiasgenerator eingeschaltet ist. Da die Substratelektrode 18 durch das erläuterte "self-biasing" aufgrund der anliegenden Substratleistung negativ vorgespannt ist, führen zu diesen Zeiten bei fallender Plasmapulsflanke generierte und während der nachfolgenden Plasmapause aufrechterhaltene Anionenkonzentrationen sowie nachfolgende ambipolare Plasmazustände nicht zu einer effizienten Entladung des Substrates 19.

Vielmehr ist es sogar so, dass durch die vergleichsweise hohe "self-bias"-Spannung an der Substratelektrode 18 während der Phasen, in denen das Plasma ausgetaktet ist, also eine sehr hohe Impedanz aufweist, eine unerwünschte Ionenbeschleunigung auftritt, die Anlass zu Profilstörungen geben kann. Darüber hinaus legt der beschriebene Betriebszustand einen Duty-Cycle, d.h. ein Puls-zu-Periode-Verhältnis, von 50 % nahe, und zwar sowohl für den Plasmagenerator 13 als auch für den Substratbiasgenerator 22. Dies bedeutet hohe benötigte Spitzenleistungen des Plasmagenerators 13 insbesondere dann, wenn gleichzeitig hohe Ätzraten gewünscht werden, also eine hohe mittlere Leistung für die Erzeugung chemisch aktiver Radikale im Plasma benötigt wird. Für einen Hochraten-

ätzprozess, der im Zeitmittel 2,7 kWatt Plasmaleistung benötigt, werden bei 50 % Duty-Cycle so Pulsleistungen von 5,4 kWatt und mehr benötigt.

5 Erhöht man andererseits den Duty-Cycle-Parameter, werden die während einer Substratbiaspause effektiv zur Verfügung stehenden Plasmapulspausen deutlich verkürzt, was die Effektivität der Taschenunterdrückung beeinträchtigt.

Letztlich nützt diese Betriebsart beider Generatoren 13, 22 die an der Substratelektrode 18 zur Verfügung stehende Pausenzeit nicht optimal aus, da nicht nur eine Plasmapause, sondern eben auch ein Plasmapulspuls in die Substratbiaspause fällt.

15 Experimente haben weiter gezeigt, dass es für die Taschenstabilität nachteilig ist, wenn sich während einer Substratbiaspulsphase die absoluten Plasma-Ein-Zeiten auf Werte größer 1 ms, insbesondere größer 2 ms, aufsummieren. Zwar findet zwischen den einzelnen Plasmapulsen auch während die Substratelektrode 18 mit Leistung beaufschlagt wird eine gewisse Entladung von Strukturen statt, diese ist allerdings vergleichsweise gering und erreicht bei weitem nicht die Effizienz eines ambipolaren Zustands.

20 Die Situation im unteren Teil der Figur 5 mit einer Plasmapulsrate von 800 Hz und einer Substratbiaspulsrate von 200 Hz, beides mit 50 % Duty-Cycle, ist also grenzwertig hinsichtlich der während eines Substratbiaspulses aufsummierten Plasma-Ein-Zeiten von 1,25 ms.

25 Da der in den Plasmapulspausen auftretende ambipolare Plasmazustand aufgrund der gleichzeitig anliegenden negativen Substratbiasspannung nicht für eine hocheffiziente Entladung des Substrates genutzt werden kann, akkumulieren sich vielmehr über die mehreren Plasmapulse während eines Substratbiaspulses anfallenden Ladungsmengen an den einschlägigen Stellen auf dem Substrat, ohne dass es zwischendurch in den Plasmapulspausen zu einer wirklich entscheidenden Abnahme dieser Ladungsmengen kommen würde. Eine gewisse Verbesserung bzw. Verringerung hinsichtlich der während eines Substratbiaspulses akkumulierten Ladungsmengen kann in dieser Situation erreicht werden, wenn die Plasmapulsfrequenz nicht als geradzahliges Vielfaches ($2n$) der Substratbiaspulsfrequenz gewählt wird, sondern als ungeradzahliges Vielfaches ($2n+1$), und wenn zusätzlich die Plasmapulsfolge so mit der Substratbiaspulsfolge synchronisiert wird, dass
35 in einen Substratbiaspuls jeweils nur n Plasmapulse fallen, während während einer Sub-

5 stratbiaspause $n+1$ Plasmapulse auftreten. Auf diese Weise wird während der Substratbiaspulsphase nur über n Plasmapulse Ladung auf dem Substrat 19 akkumuliert (entsprechend $n+1$ Plasmapausen), während während der Substratbiaspause $n+1$ Plasmapulse und entsprechend nur $n-1$ Plasmapausen auftreten. Im Falle eines ungeradzahligen Frequenzverhältnisses ist eine Synchronisation beider Pulszüge jedoch unbedingt zu empfehlen.

15 Die unerwünschte Ladungsakkumulation in Betriebszuständen, bei denen der Substratbiasgenerator 22 und der Plasmagenerator 13 gleichzeitig einen Puls bereitstellen, zwingt jedoch letztlich zur Reduktion der Duty-Cycle-Parameter für beide Generatoren 13, 22 im Interesse der Taschenstabilität, um so einerseits die Substratbiaspulse relativ zu den Substratbiaspausen und andererseits auch die Plasmapulse relativ zu den Plasmapausen möglichst kurz zu gestalten. Letztere Maßnahme ist jedoch für die chemische Aktivität des Plasmas im Hinblick auf die Radikalengeneration von Nachteil, d.h. es ist bevorzugt, an dieser Stelle zumindest einen Wert von 50 % zu halten.

20 Eine optimale Situation ist unter Berücksichtigung der vorstehenden Erkenntnisse gegeben, wenn die Substratbiaspulse so kurz gewählt sind, dass während eines Substratbiaspulses keine schädliche Ladungsmenge auf dem Substrat 19 akkumuliert werden kann, und wenn die Plasmapulse möglichst so mit den Substratbiaspulsen synchronisiert werden, dass eine möglichst kurze Plasmapause, d.h. bei einem möglichst hohen Duty-Cycle von 50 % bis 90 %, vorzugsweise 80 %, ausschließlich während einer Substratbiaspause stattfindet. In diesem Fall wird die Plasmapause optimal genutzt, da sie vollständig in eine Substratbiaspause fällt, und es wird ein maximaler Duty-Cycle-Wert für die Plasmapulsung und damit eine hohe Plasmaanregung möglich. Der Substratbias-Duty-Cycle
25 kann dann weiter unter Beachtung der Randbedingung hinsichtlich des Zusammentreffens beider Pausenzeiten unabhängig gewählt werden, beispielsweise auf Werte zwischen 25 % und 75 %, vorzugsweise 50 %.

30 Eine besondere vorteilhafte Verfahrensführung sieht daher den Einsatz eines schnell pulsbaaren Substratbiasgenerators 22, beispielsweise vom Typ RF10-S/PWT der Firma RFPP, vor, der eine Grenzfrequenz von beispielsweise 100 kHz aufweist. Dieser kann dann in jedem Fall mit der gleichen Frequenz gepulst werden wie der Plasmagenerator 13.

In Figur 6 wird ein entsprechendes Ausführungsbeispiel erläutert, bei dem aus dem Puls-
zug des Plasmagenerators 13 über den Pulsgenerator 63 oder durch einen HF-
Demodulator ein Triggersignal für den Pulsgeber 64 abgeleitet wird, mit dem mit gleicher
Frequenz wie das Triggersignal und fester Phasenbeziehung zum Plasmagenerator 13
5 Pulse variabler Länge erzeugt werden können, welche zur Pulsung des Substratbiasgene-
rators 22 eingesetzt werden.

Bevorzugt wird der Plasmagenerator 13 gemäß Figur 6 mit einer Frequenz von 2 kHz und
einem Duty-Cycle von 80 % gepulst, so dass der Substratleistungsgenerator 22 ebenfalls
mit dieser Frequenz und Pulslängen von beispielsweise 0,25 ms arbeitet, was einem Du-
ty-Cycle von 50 % entspricht.

Die Figur 7 zeigt das der Figur 6 zugeordnete Pulsschema, dessen Verständnis sich dem
Fachmann neben den hier gegebenen Erläuterungen auch aus Figur 2 bzw. Figur 3 in DE
15 101 45 297.7 und den dort dazu gegebenen Erläuterungen erschließt.

Im Einzelnen wird gemäß Figur 7 mit steigender Flanke der Signaleinhüllenden bzw. des
Plasmapulses 40 am Ausgang des Plasmagenerators 13 ein Substratbiaspuls 30 erzeugt,
der sich über die ersten 0,25 ms des Plasmapulses 40 mit dem Ausgangssignal des Plas-
magerators 13 deckt. Danach fällt der Substratbiaswert auf 0, während der Plasmagene-
rator 13 noch Hochfrequenz an das Plasma abgibt und für die Erzeugung chemisch akti-
ver, beispielsweise ätzender und/oder passivierender Radikale sorgt. Während dieser
Zeitspanne kommt es bereits zu einer gewissen Entladung von Aufladungsphänomenen
auf dem Substrat 19, allerdings noch nicht sehr effizient. Erst mit dem Abschalten des
20 Plasmagenerators 13 während der Substratbiaspause 31 und Beginn der Plasmapulspause
41 tritt der ambipolare Plasmazustand mit hoher Anionenkonzentration gemäß Figur 2
ein, d.h. alle Ladungsphänomene auf dem Substrat 19 werden nun hocheffizient abge-
baut, da das Plasma dem Substrat 19 mit nahezu identischem Potenzial von ca. 0 Volt ge-
genübersteht.

Die Figur 8 zeigt die Situation gemäß Figur 7 bei Doppelpulsung der Substratelektrode
18 nach Art der DE 199 57 169 A1. Dabei wird durch schnelle Modulation eines bei-
spielsweise bei 13,56 MHz betriebenen Substratleistungsgenerators 22, beispielsweise
über den Pulsgeber 62 mit 100 kHz und 10 % Duty-Cycle, ein Niederfrequenzbiasing
emuliert, d.h. man erhält die wesentlichen Vorteile eines Niederfrequenzbiasing, ohne
35

dessen Nachteile in Kauf nehmen zu müssen. Das derart schnell modulierte hochfrequente Trägersignal 34 des Substratbiasgenerators 22 wird gemäß Figur 8 zudem über den niederfrequenten Pulsgeber 64 im kHz-Bereich bei einem Duty-Cycle von 25 % bis 75 %, beispielsweise 50 %, gepulst. Als Trigger für diesen Pulsgeber 64 kann wiederum ein aus dem Pulszug des Plasmagenerators 13 abgeleitetes Signal herangezogen werden. Bevorzugt wird dazu ein HF-Demodulator eingesetzt, um aus dem hochfrequenten Ausgangssignal des Plasmagenerators 13 eine zur Einhüllenden proportionale Spannung zu erzeugen. Der Plasmagenerator 13 wird weiter bevorzugt mit einer Repetitionsrate von 1 kHz bis 3 kHz, vorzugsweise 2 kHz, bei einem Duty-Cycle von 80 % gepulst. Der substratseitige Pulsgeber 64 wird ebenfalls mit dieser Frequenz und einem Duty-Cycle von 50 % entsprechend einer Pulszeit von 0,25 ms betrieben. Die feste Phasenbeziehung zwischen beiden Pulszügen bzw. den Pulsgebern 63, 64 ergibt sich aus der Art des Triggers. Im Übrigen ist es im Rahmen des erläuterten Beispiels ohne Weiteres möglich, auch andere Methoden zur frequenz- und phasenstarken Verriegelung beider Pulsgeber 63, 64 bzw. Pulszüge einzusetzen wie eine Synchronisationsschaltung zweier freilaufender Pulsgeneratoren oder einen PLL-Kreis.

Die Figur 9 zeigt das der Figur 8 zugeordnete Pulsschema analog zu Figur 6 und Figur 7. Dabei wird der Substratbiaspulszug mit beispielsweise 2 kHz Repetitionsrate und beispielsweise 50 % Duty-Cycle von dem Plasmapulsschlag mit beispielsweise 80 % Duty-Cycle eingehüllt, wobei die Synchronisation bzw. Triggerschaltung dafür Sorge trägt, dass die Plasmapulspause 41 stets während der Substratbiaspause 31 zu einem wohldefinierten Zeitpunkt auftritt.

Als Trigger kann auch hier die steigende Flanke des Signals des Plasmagenerators 13 dienen, die den Substratbiaspuls 30 bzw. 32 auslöst. In Figur 9 ist überdies vorgesehen, dass der Plasmagenerator 13 den Plasmapulsschlag 40 noch bereitstellt, während die Substratbiasspannung bereits ausgeschaltet ist. Da das Plasma in diesem Zustand immer noch ca. 10 V bis 20 V über dem Substratpotential liegt, beginnen zwar bereits Entladevorgänge auf dem Substrat 19 zum Abbau schädlicher Aufladungen, diese sind allerdings aus den schon erwähnten Gründen nicht besonders effektiv. Mit Abschalten des Plasmagenerators 13, d.h. in der Plasmapulspause 41, tritt dann aber eine hohe Anionenkonzentration auf, die die Elektronen als negative Ladungsträger ablösen, d.h. es kommt zu einem ambipolaren Plasmazustand. Da zu dieser Zeit die Substratbiasspannung immer noch ausgeschaltet ist, können jetzt hocheffiziente Entladevorgänge einsetzen, die schädliche Aufladungen

auf dem Substrat 19 innerhalb kürzester Zeit vollständig abbauen. Die Figur 9 zeigt somit in Verbindung mit Figur 8 ein besonders bevorzugtes Ausführungsbeispiel der Erfindung.

Insbesondere sind in Figur 9 die Ein- und Auszeiten der beiden Generatoren 13, 22 optimal miteinander kombiniert, so dass es keine nutzlosen Plasma-Aus-Zustände gibt, während die Substratbiasspannung noch "ein" ist.

Der Unterschied von Figur 9 zu Figur 7 besteht im Übrigen lediglich darin, dass der hochfrequente Pulszug an der Substratelektrode 18 in sich zusätzlich noch eine schnelle Modulation mit beispielsweise 100 kHz und einem sehr niedrigen Duty-Cycle von beispielsweise 10 % aufweist, um so auch die Vorteile eines niederfrequenten Biasing zu nutzen ohne dessen Nachteile in Kauf nehmen zu müssen.

Die Pulsfrequenzen für die Substratbiasspulse 30 und die Plasmapulse 40, die in den Figuren 6 bis 9 jeweils gleich sind, sollten generell 250 Hz nicht unterschreiten. Eine Frequenz von 500 Hz ist grenzwertig hinsichtlich der gewünschten Taschenunterdrückung, ab einer Frequenz von 1000 Hz wird auch im Fall einer Überätzung von 200 % in schmalen Trenchgräben mit hohen Aspektverhältnissen keine Taschenbildung mehr an einer dielektrischen Grenzfläche als Ätzstopp beobachtet. Besonders bevorzugt sind Frequenzen von 1000 Hz bis 10000 Hz, beispielsweise 2000 Hz bis 3000 Hz. Dabei ist zu beachten, dass bei höheren Frequenzen Plasmazündaussetzer zusammen mit hoher reflektierter Leistung immer häufiger auftreten, was jedoch mit bereits in DE 101 45 297.7 beschriebenen Massnahmen korrigiert werden kann.

Als besonders vorteilhaft hat sich weiter herausgestellt, wenn in den ambipolaren Plasmaphasen ohne Substratbiasspannung beispielsweise gemäß Figur 7 oder Figur 9 oder permanent dem Plasma ein leichtes und/oder leicht ionisierbares Inertgas zugesetzt wird, vorzugsweise Helium. Im ambipolaren, biaslosen Zustand sind ionisierte Heliumatome sehr leicht durch elektrische Ladungen ablenkbar und können diese bei entsprechendem Vorzeichen besonders gut entladen. Insofern ist Helium aufgrund seiner geringen Masse ideal geeignet zum "Aufspüren" und Entladen schädlicher Ladungsagglomerationen auf dem Substrat 19. Andererseits stört eine geringe Heliumbeimischung von einigen % des Gesamtgasflusses, vorzugsweise maximal 10 % bis 15 % des Gesamtgasflusses auch wenn sie permanent zugesetzt wird das Plasma nicht, sondern bewirkt im Gegenteil sogar eine Stabilisierung der Entladung. Wirklich wirksam ist Helium allerdings nur in den am-

bipolaren, biaslosen Phasen, da nur dann die Aufladungseffekte "sichtbar" werden und durch entsprechend niederenergetische Ionen neutralisiert werden können, die andernfalls, d.h. ohne den ambipolaren Plasmazustand, gar nicht zum Substrat 19 gelangen würden.

5

Eine Anwendung der vorstehend erläuterten Ausführungsbeispiele betrifft vor allem die bereits mit Hilfe der Figur 1 erläuterte Unterdrückung der Taschenbildung an einer dielektrischen Grenzfläche 60 beim Ätzen von beispielsweise Silizium. Dabei erreichen im ambipolaren Plasma und biaslosem Substratzustand negativ geladene Ionen (Anionen) mit geringer Energie den durch positive Ionen aufgeladenen dielektrischen Ätzgrund geätzter Strukturen, und können dort schädliche Ladungen neutralisieren. Gleichzeitig können positiv geladene Ionen mit geringer Energie auch in erzeugte Trenchgräben mit einem hohen Aspektverhältnis vordringen, und dort im Bereich der Seitenwände in der Nähe des dielektrischen Ätzstopps akkumulierte Elektronenmengen entladen.

15

Eine weitere Anwendung der vorstehend erläuterten Ausführungsbeispiele und gleichzeitig eine bisher kritische Situation beim Plasmaätzen zeigt Figur 10: Ein ungerichteter Einfall von niederenergetischen Elektronen sowie von gerichteten Ionen mit einer Energie von mindestens 10 eV bis 20 eV Energie (zuzüglich der erläuterten "selfbiasing"-

20

Spannung) führen zum Auftreten von Elektronenakkumulationen im oberen Teil von Trenchgräben in der Nähe des Maskenrandes. Die Ränder der Maske aus Photolack (PL) oder SiO_2 stellen dabei einen Isolator dar, auf dem Elektronen "getrappt" werden. Desweiteren besteht auch die Seitenwandpassivierung bei den meisten Ätzprozessen für Silizium aus einem mehr oder weniger isolierenden Material, und zwar auch bei solchen Prozessen, die nicht explizit eine Schichtabscheidung beinhalten.

25

So setzen neben der Abscheidung von Seitenwandfilmen, beispielsweise von teflonartigen Materialien (PTFE) gemäß DE 42 41 045 C1, einige Prozesse auch auf eine Oxidation oder Nitrifizierung der Seitenwände, um diese vor einem Ätzangriff zu schützen. Insbesondere sind Prozesse auf Chlor- oder Brombasis oder kryogene Siliziumätzprozesse bekannt, die auf SiO_2 artige Seitenwandschutzfilme oder eine Seitenwandoxidation auf atomarer Ebene setzen.

30

In jedem Fall sind diese Schutzfilme zumindest lokal elektrisch isolierend und können punktuelle oder sogar flächige Elektronenansammlungen akkumulieren, d.h. sie bilden i-

35

solierende, elektrisch geladene inselförmige Bereiche aus, die häufig in der Nähe der Trench Eintrittsöffnung, gelegentlich aber auch einfach irgendwo punktuell verteilt auf der Seitenwand sitzen.

5 Diese inselförmigen, elektrisch geladenen Bereiche rufen starke elektrische Felder hervor, die "Querschläger", d.h. positive Ionen, die vom Ätzgrund reflektiert werden, anziehen und zusätzlich in die geladenen Bereiche hinein beschleunigen. Solche "Querschläger" führen zu einer Beschädigung der Seitenwandpassivierung und zu einer Unterätzung des betroffenen Bereiches. Insgesamt führt dieser Mechanismus vor allem beim Hochratenätzen von Silizium zu Hinterschneidungen unterhalb des Maskenrands sowie zu spontan an der Seitenwand von tiefer geätzten Strukturen auftretenden unregelmäßigen, spalten- oder lochartigen Penetrationen der Seitenwandpassivierung, wie dies im unteren Teil von Figur 10 gezeigt ist.

15 Diese unerwünschten Effekte können mit der erläuterten erfindungsgemäßen Verfahrensführung wirksam unterdrückt werden, da im Fall eines ambipolaren Plasmas in Verbindung mit einem biaslosen Substratzustand, welcher sich periodisch wiederholt, Ionen (Anionen und Kationen) von sehr niedriger Energie Ladungen überall im Trenchgraben aufspüren und neutralisieren können, wobei die Ionenenergien noch so gering sind, dass sie noch keinen Schaden anrichten können - zumindest wenn man so rasch aufeinanderfolgend für diesen ambipolaren, biaslosen Zustand sorgt, dass sich in der Zwischenzeit keine gefährlichen elektrischen Felder aufbauen können.

20 Im Übrigen erweist sich gerade für das "Aufspüren" und Neutralisieren von punktuell auf der Seitenwand feststehenden Ladungsmengen der bereits erwähnte He-Zusatz als besonders wirksam. Damit werden sehr tief geätzte Profile stabiler, die Seitenwand wird nicht länger von Löchern und Spalten durchbrochen, und Unterätzungen unterhalb der Maske vermieden.

25 Eine weitere Anwendung der vorstehend erläuterten Ausführungsbeispiele betrifft einen Vorprozess zur Opferschichtätzung in Silizium mit Hilfe von Fluorradikalen oder einer hochoxidierenden Fluorverbindung, vorzugsweise ClF_3 , wie sie in DE 44 20 962 C2 oder DE 198 47 455 A1 vorgeschlagen worden ist.

Die Figur 11 zeigt dazu im oberen Teil, wie die Seitenwand einer zuvor anisotrop geätzten Siliziumstruktur mit einer Passivierschicht bedeckt worden ist, die beispielsweise als SiO_2 -Schicht oder als teflonartige Schicht analog zur Seitenwandpassivierung gemäß DE 42 41 045 C1 abgeschieden wurde. Vor der Aufbringung der teflonartigen Schicht wird im Interesse einer guten Haftung auf dem Silizium dieses im Übrigen bevorzugt kurz überätzt, beispielsweise mit Hilfe eines Plasmaätzschrittes unter Einsatz von CF_4 oder C_2F_6 , um durch ein Anätzen der Siliziumoberfläche diese zu reinigen, von Oxid zu befreien, zu aktivieren und mit Fluorcarbonbindungen zu initialisieren, bevor anschließend mit Hilfe eines Plasmas auf die aktivierte Oberfläche in situ mit Hilfe von C_4F_8 , C_3F_6 oder C_4F_6 die Teflonschicht abgeschieden wird. Diese Schicht bedeckt dabei sowohl die Seitenwand als auch den Boden der geätzten Struktur und ist elektrisch isolierend. Bevor dann eine Opferschichtätzung stattfinden kann, muss diese Passivierung am Ätzgrund danach zunächst durchbrochen und so der Zugang zu einer Opferschicht aus Silizium eröffnet werden, ohne dass die Seitenwandpassivierung beschädigt wird. Dies geschieht beispielsweise mit einem Oxidätzprozess auf der Basis von C_2F_6 , C_4F_8 , CF_4 mit CHF_3 oder CF_4 mit C_4F_8 oder mit Hilfe eines Ätzprozesses zum Entfernen der teflonartigen Seitenwandpassivierung, beispielsweise auf der Basis von O_2 , CF_4 oder C_2F_6 , oder alternativ auch lediglich durch Sputtern mit Argon oder einer Argon-Helium-Mischung als Prozessgas.

Auch bei diesem Verfahren kommt es vielfach zu den beschriebenen elektrischen Aufladungsphänomenen auf der dielektrischen Seitenwandpassivierung, d.h. entweder einer Schicht aus SiO_2 oder einem teflonartigen Material, die zu einer Ionenablenkung und Beschädigung des Seitenwandfilms führen. Diese Beschädigungen treten überwiegend im oberen Teil der Strukturen und an einer dielektrischen Trennschicht im unteren Teil der Strukturen auf, insbesondere bei Trenchgräben mit hohen Aspektverhältnissen.

Bei einem anschließenden Opferschichtätzprozess, vorzugsweise unter Einsatz von gasförmigem ClF_3 , gemäß dem unteren Teil in Figur 11 führen diese Beschädigungen dann zu einem unkontrollierten Ätzen des eigentlich durch die Seitenwandfilme zu schützenden Siliziums. Dieser Schadensmechanismus ist letztlich das wesentliche limitierende Element bei der Silizium-basierten Opferschichttechnik, d.h. das Prozessfenster ist bisher insbesondere hinsichtlich erzielbarer Aspektverhältnisse von Trenchgräben, die noch zuverlässig passiviert werden können, stark eingeschränkt.

Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren, das noch durch Heliumzusatz verbessert werden kann, werden diese Probleme überwunden und ein weites Prozessfenster auch für die ClF_3 -Opferschichttechnik bzw. dessen Vorprozess, d.h. das Öffnen einer Bodenpassivierung eines Trenchgrabens, eröffnet.

5

Mit Hilfe der Figur 12 wird schließlich erläutert, welche Konsequenzen elektrische Aufladungen beim Ätzen von Dielektrika, beispielsweise von dicken Oxidschichten oder Nitridschichten, haben können. Bisher weisen vor allem dicke Dielektrika, die mit hohem Aspektverhältnis über ein Plasmaätzverfahren strukturiert worden sind, im oberen Teil der Profile vielfach Profilstörungen durch elektrische Aufladungen, d.h. im Wesentlichen "getrappte" Elektronen im Isolatormaterial auf, die zu hohen Feldern und Ionenablenkung mit nachfolgender Schädigung führen.

15

Diesen Profilstörungen wird bisher dadurch begegnet, dass man einen erhöhten Maskenabtrag und eine Facettierung der Ätzmaske in Kauf nimmt, um durch Verschleppung abgetragenen Maskenmaterials den oberen Teil der Ätzgraben verstärkt zu schützen und so die im unteren Teil der Figur 12 angedeuteten Profilstörungen zu vermeiden. Die Maskenrandfacettierung, d.h. das kontrollierte Zurückweichen der Maske von der Öffnung des Ätzgrabens, ist somit ein weiteres Hilfsmittel, um die Profilprobleme im oberen Teil des Ätzgrabens zu verschleiern.

20

Auch diese Problematik wird durch das erfindungsgemäße Verfahren bereinigt. So wird während der biaslosen Phasen an der Substratelektrode 18 das Plasma durch Austasten zeitweise ambipolar, d.h. es können nunmehr Ionen (Anionen und Kationen) sehr niedriger Energie das Innere der Ätzgräben erreichen und dort akkumulierte Ladungen effektiv aufspüren und neutralisieren. Besonders gut sind hierfür möglichst leichte Ionen wie beispielsweise Heliumionen geeignet.

25

30

Da zwischen dem Substrat 19 und dem ambipolaren Plasma kein Potentialunterschied mehr vorliegt, reichen bereits minimale elektrische Felder, um Ionen aus dem ambipolaren Plasma zu den entsprechenden, die Felder verursachenden Ladungsmengen anzuziehen und diese zu neutralisieren. Dadurch werden Aufladungen frühzeitig und effizient abgebaut, bevor sie eine Größenordnung erreichen, bei der die durch sie bewirkten elektrischen Felder zu Ionen-Schäden führen.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Einätzen von Strukturen in einen Ätzkörper, insbesondere von mit einer Ätzmaske lateral exakt definierten Ausnehmungen in einen Siliziumkörper, mittels eines Plasmas, wobei in den Ätzkörper über eine Substratelektrode mittels einer hochfrequenten Wechselspannung zumindest zeitweilig eine insbesondere hochfrequent gepulste, niederfrequent modulierte Hochfrequenzleistung eingekoppelt und das Plasma in seiner Intensität als Funktion der Zeit moduliert, insbesondere gepulst wird, dadurch gekennzeichnet, dass zu einem Zeitpunkt, zu dem zumindest näherungsweise ein ambipolares Plasma vorliegt, in den Ätzkörper (19) über die Substratelektrode (18) keine Hochfrequenzleistung eingekoppelt wird.
2. Verfahren zum Einätzen von Strukturen in einen Ätzkörper, insbesondere von mit einer Ätzmaske lateral exakt definierten Ausnehmungen in einen Siliziumkörper, mittels eines Plasmas, wobei in den Ätzkörper über eine Substratelektrode mittels einer hochfrequenten Wechselspannung zumindest zeitweilig eine insbesondere hochfrequent gepulste, niederfrequent modulierte Hochfrequenzleistung eingekoppelt und das Plasma in seiner Intensität als Funktion der Zeit moduliert, insbesondere gepulst wird, dadurch gekennzeichnet, dass eine feste, ganzzahlige Phasenbeziehung zwischen einem über die Substratelektrode (18) in den Ätzkörper (19) eingekoppelten Pulszug und einem zur zeitlichen Modulation der Plasmaintensität in das Plasma eingekoppelten Pulszug vorliegt.
3. Verfahren zum Einätzen von Strukturen in einen Ätzkörper, insbesondere von mit einer Ätzmaske lateral exakt definierten Ausnehmungen in einen Siliziumkörper, mittels eines Plasmas, wobei in den Ätzkörper über eine Substratelektrode mittels einer hochfrequenten Wechselspannung zumindest zeitweilig eine niederfrequent gepluste Hochfrequenzleistung eingekoppelt und das Plasma in seiner Intensität als Funktion der Zeit moduliert, insbesondere gepulst wird, dadurch gekennzeichnet, dass Plasma mit einer Frequenz von mindestens 500 Hz, insbesondere 1 kHz bis 10 kHz, gepulst wird.
4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Pulsung des Plasmas und die niederfrequente Pulsung der Hochfrequenzleistung mit gleicher Frequenz und fester Phasenbeziehung derart erfolgt, dass während einer Substratpulsphase eine Plasmapulspause auftritt.

5. Verfahren zum Einätzen von Strukturen in einen Ätzkörper, insbesondere von mit einer Ätzmaske lateral exakt definierten Ausnehmungen in einen Siliziumkörper, mittels eines Plasmas, wobei in den Ätzkörper über eine Substratelektrode mittels einer hochfrequenten Wechselspannung zumindest zeitweilig eine insbesondere hochfrequent gepulste, niederfrequent modulierte Hochfrequenzleistung eingekoppelt und das Plasma in seiner Intensität als Funktion der Zeit moduliert, insbesondere gepulst wird, dadurch gekennzeichnet, dass zumindest zu einem Zeitpunkt, zu dem ein zumindest näherungsweise ambipolares Plasma vorliegt, dem Plasma ein leichtes und/oder leicht ionisierbares Inertgas, insbesondere Helium, zugesetzt wird.

6. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass das Helium zumindest zu einem Zeitpunkt zugesetzt wird, zu dem in den Ätzkörper (19) über die Substratelektrode (18) keine Hochfrequenzleistung eingekoppelt wird.

7. Verfahren zum Einätzen von Strukturen in einen Ätzkörper, insbesondere von mit einer Ätzmaske lateral exakt definierten Ausnehmungen in einen Siliziumkörper, mittels eines Plasmas, wobei in den Ätzkörper über eine Substratelektrode mittels einer hochfrequenten Wechselspannung zumindest zeitweilig eine insbesondere hochfrequent gepulste, niederfrequent modulierte Hochfrequenzleistung eingekoppelt und das Plasma in seiner Intensität als Funktion der Zeit moduliert, insbesondere gepulst wird, dadurch gekennzeichnet, dass als Plasmapulsfrequenz ein ungeradzahliges Vielfaches der Frequenz der niederfrequenten Modulation der über die Substratelektrode (18) in den Ätzkörper (18) eingekoppelten Hochfrequenzleistung eingestellt wird, und dass beide Modulationen derart miteinander synchronisiert werden, dass in einen über die Substratelektrode (18) in das Substrat (19) eingekoppelten Puls jeweils n Plasmapulse ($n = 1, 2, 3, \dots$) fallen, während während einer Pause einer Energieeinkopplung in das Substrat (19) $n+1$ Plasmapulse auftreten.

8. Verwendung des Verfahrens gemäß der Anmeldung DE 101 45 297.7 und/oder nach einem der vorangehenden Ansprüche beim Einbringen von Strukturen, insbesondere von Trenchgräben mit hohem Aspektverhältnis, in eine dielektrische Schicht oder einen dielektrischen Grundkörper.

9. Verwendung des Verfahrens gemäß der Anmeldung DE 101 45 297.7 und/oder nach einem der vorangehenden Ansprüche beim Einbringen von Strukturen, insbesondere von Trenchgräben mit hohem Aspektverhältnis, in eine Schicht aus Silizium, wobei nach dem Erzeugen der Strukturen zumindest bereichsweise eine isotrope Unterätzung und/oder eine isotrope Opferschichtätzung, insbesondere unter Verwendung von Fluorradikalen oder einer hochoxidierenden Fluorverbindung wie ClF_3 , vorgenommen wird.

Zusammenfassung

5 Es werden weitere Varianten des Verfahrens zum Einätzen von Strukturen in einen Ätzkörper (19), insbesondere von mit einer Ätzmaske lateral exakt definierten Ausnehmungen in einen Siliziumkörper, mittels eines Plasmas gemäß DE 101 45 297.7 vorgeschlagen. Daneben wird die Verwendung dieses Verfahrens beim Einbringen von Strukturen, insbesondere von Trenchgräben mit hohem Aspektverhältnis, in eine dielektrische Schicht oder einen dielektrischen Grundkörper sowie in eine Schicht aus Silizium vorgeschlagen, wobei im Fall der Schicht aus Silizium nach dem Erzeugen der Strukturen zumindest bereichsweise eine isotrope Unterätzung und/oder eine isotrope Opferschichtätzung, insbesondere unter Verwendung von Fluorradikalen oder einer hochoxidierenden Fluorverbindung wie ClF_3 , vorgenommen wird.

Figur 9

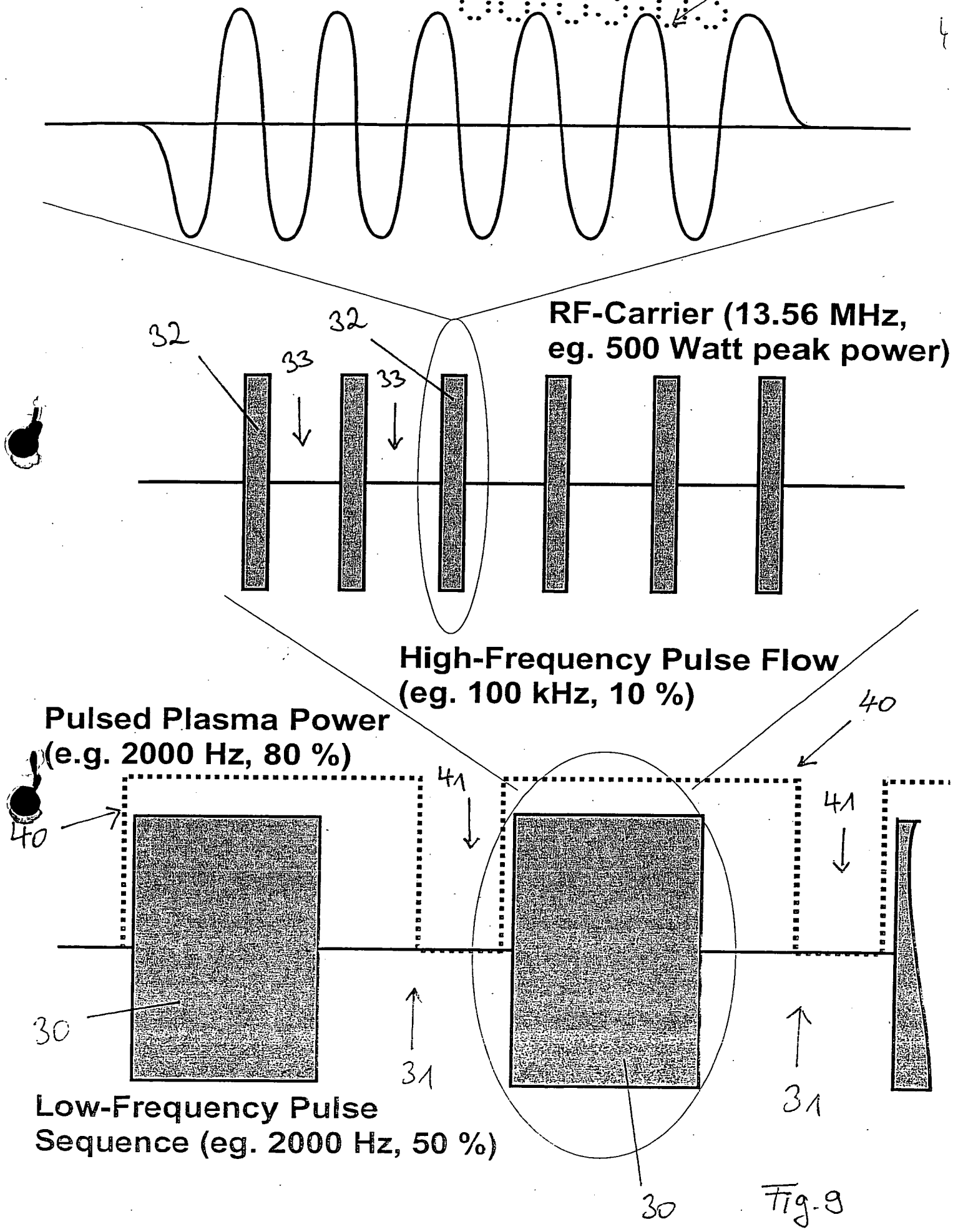


Fig. 9

1111

05.24.19.1 4

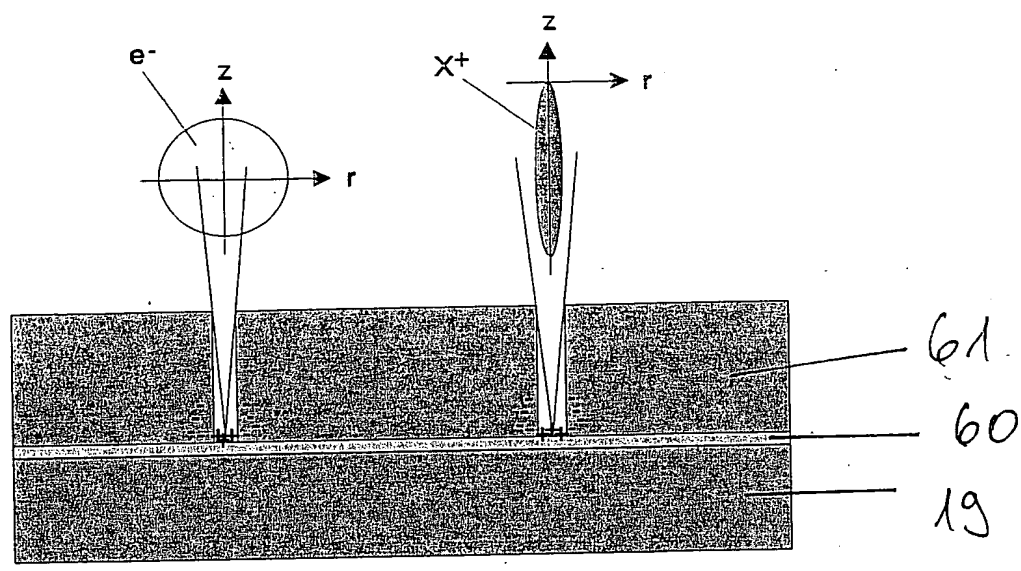


Fig. 1

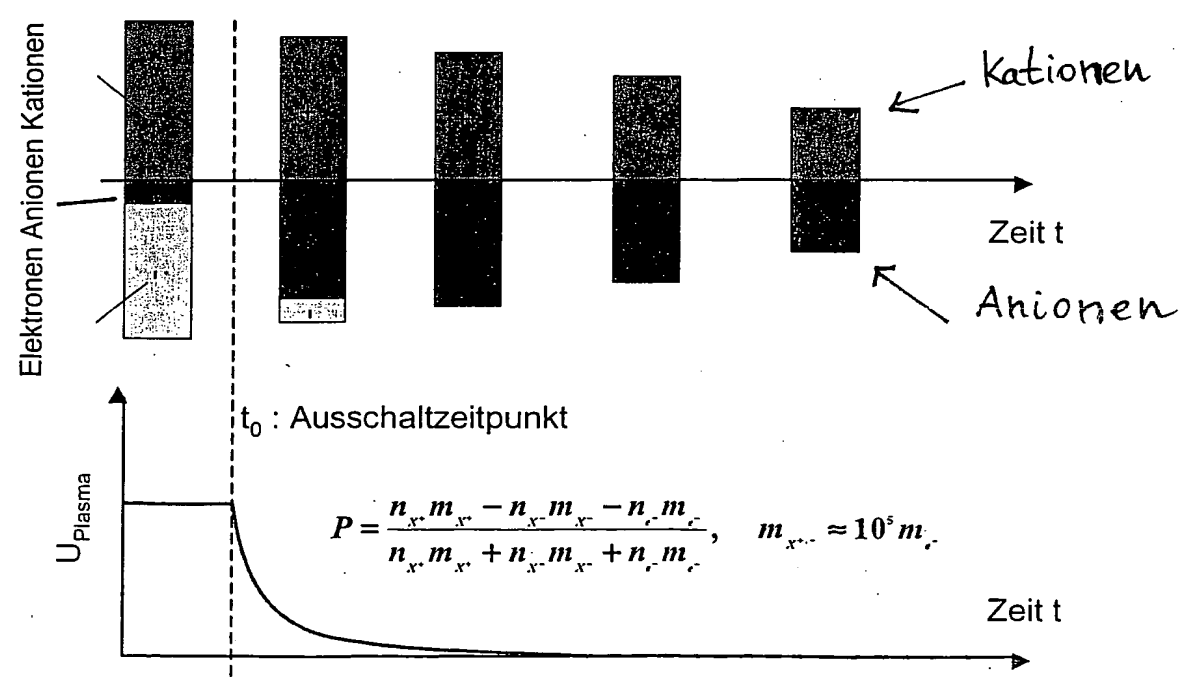


Fig. 2

3111

08.04.1991 24

11

18

22

64

19

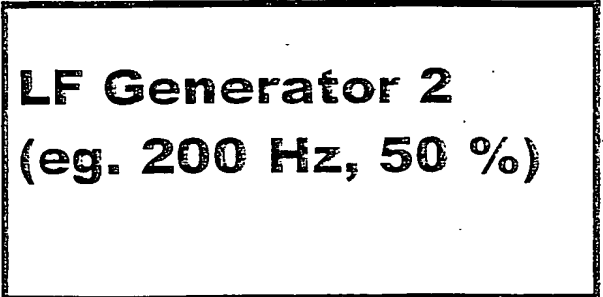
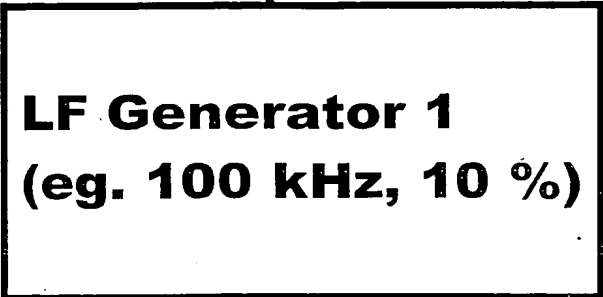
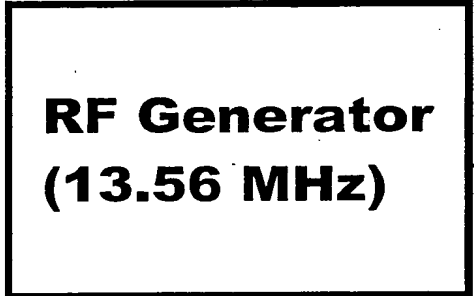
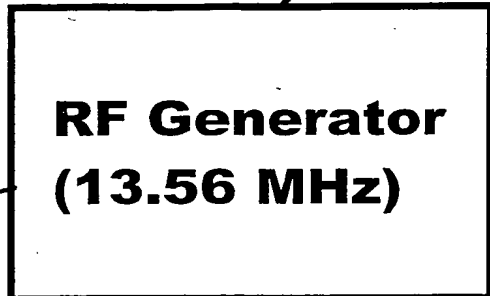
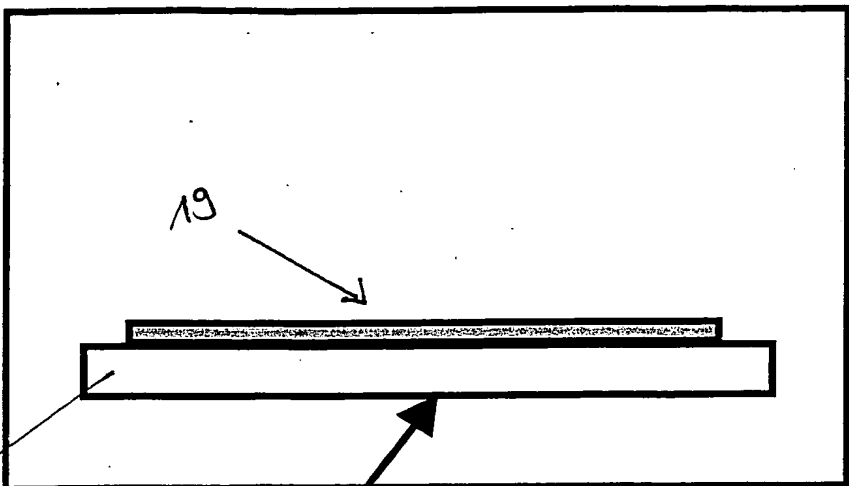
10

11

5

13

63



**Synchron.
(optional)**

Fig. 4

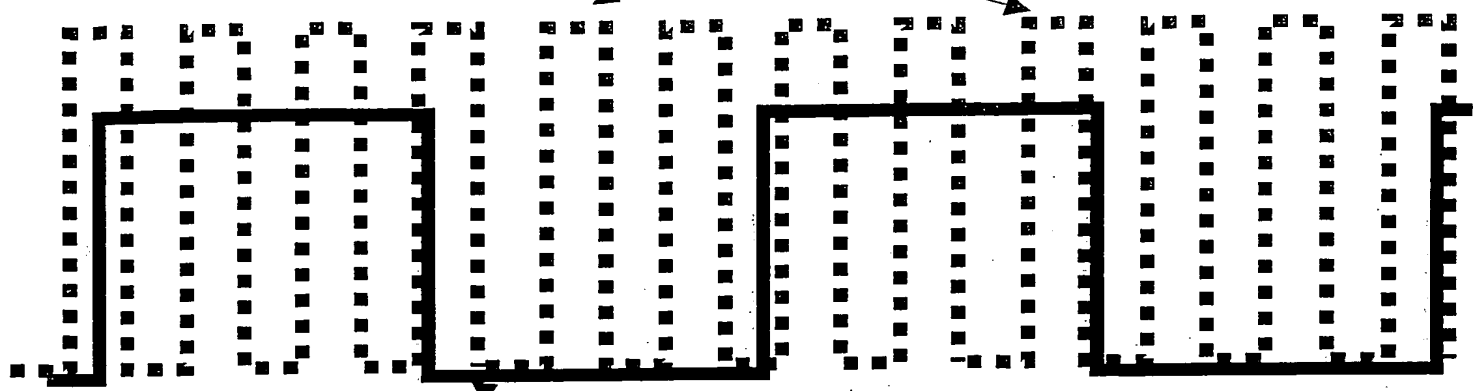
62

4111

2.4.16.19

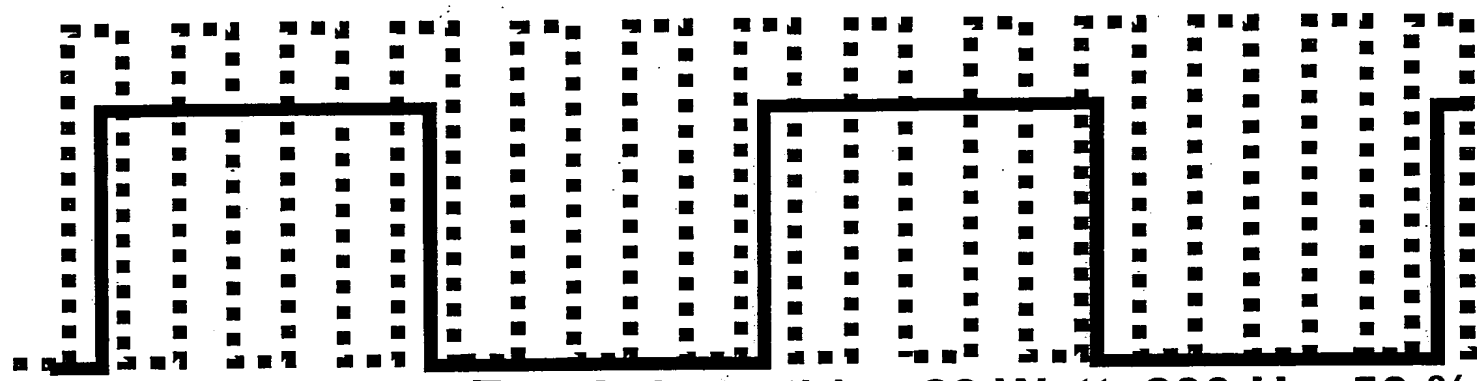
10

Plasmaleistung (ICP-Power): z.B. 3 kWatt,
1.15 kHz, 50 %



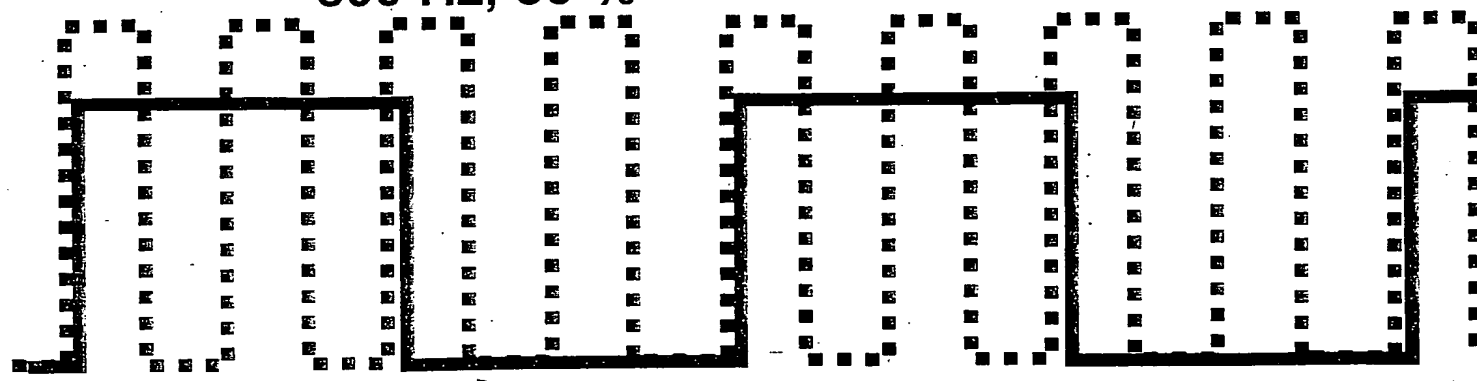
Substratbias 20 Watt, 200 Hz, 50 %

Plasmaleistung (ICP-Power): z.B. 3 kWatt,
1.20 kHz, 50 %



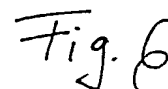
Substratbias 20 Watt, 200 Hz, 50 %
(opt. sync.)

Plasmaleistung (ICP-Power): z.B. 3 kWatt,
800 Hz, 50 %



Substratbias 20 Watt, 200 Hz, 50 %
(opt. sync.)

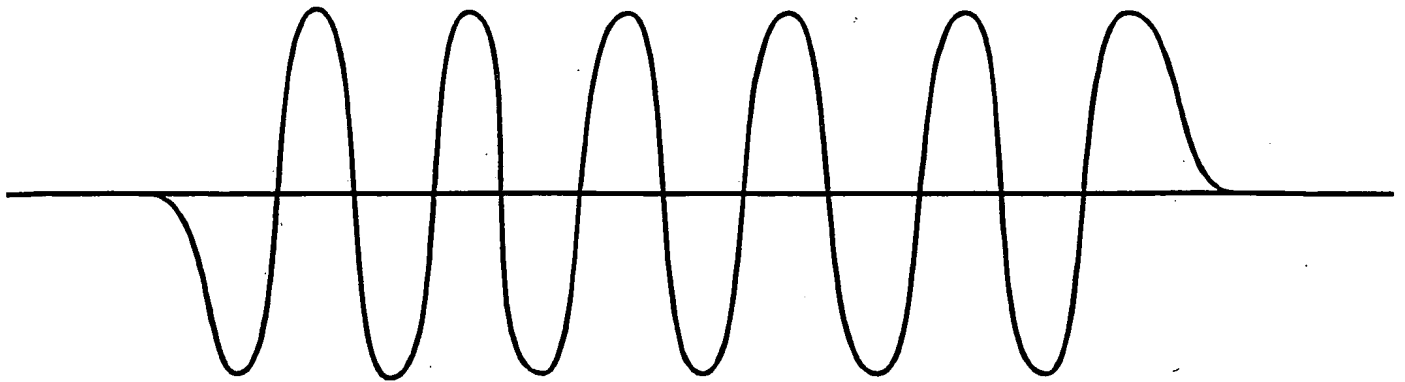
Fig. 5



6111

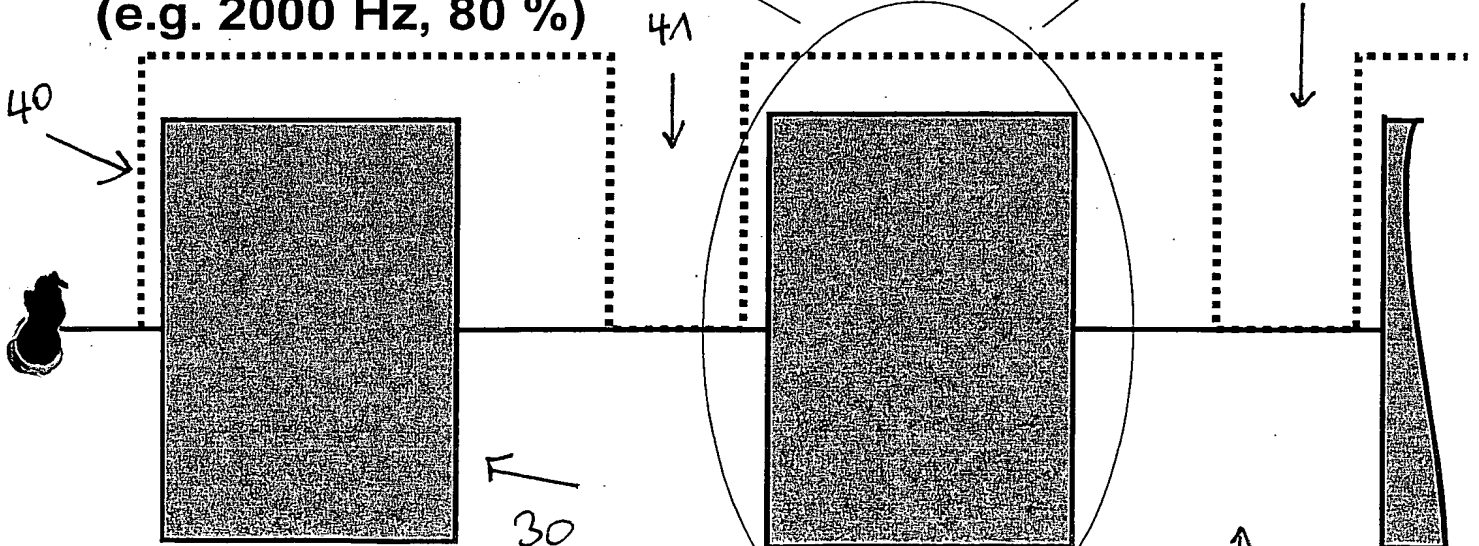
08.00019-1 32

34



Low//High Frequency Carrier
380 kHz//13.56 MHz

Pulsed Plasma Power
(e.g. 2000 Hz, 80 %)



Low-Frequency Pulse
Sequence (eg. 2 kHz, 50 %)

31

30

31

Fig. 7

7111

08. R. 41618.1 33

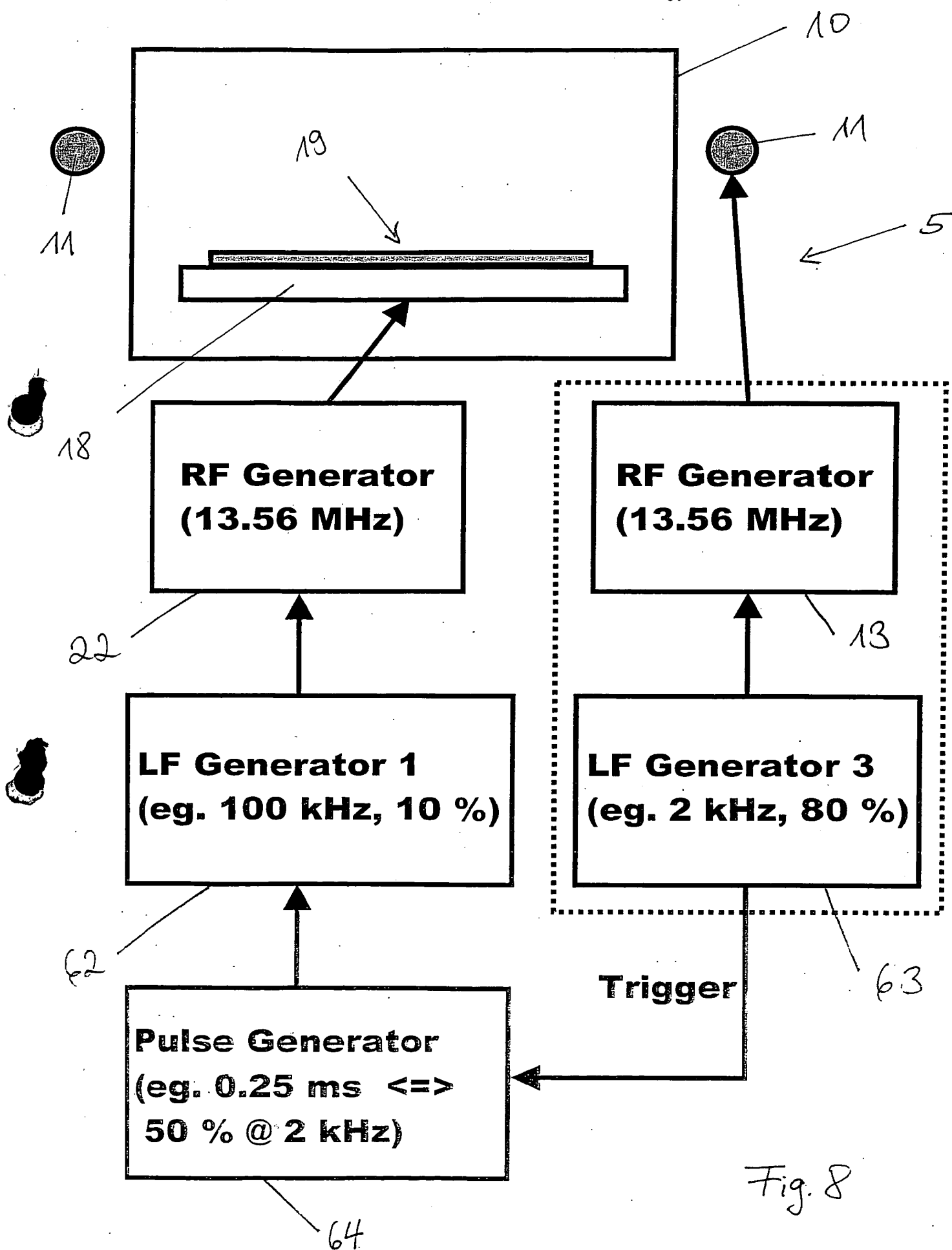
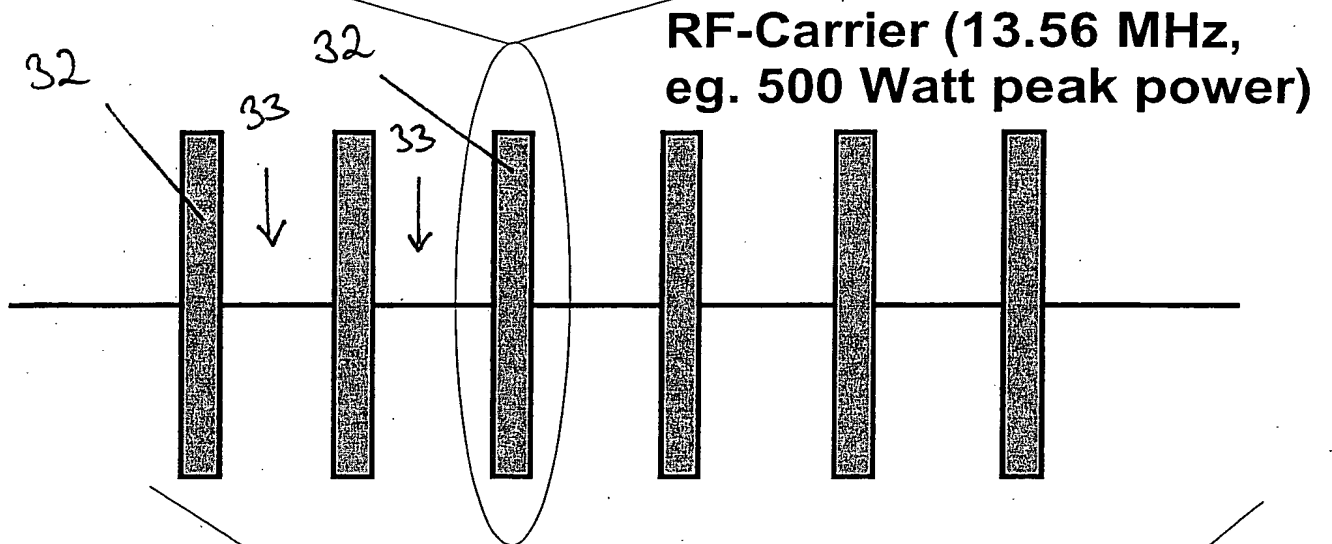
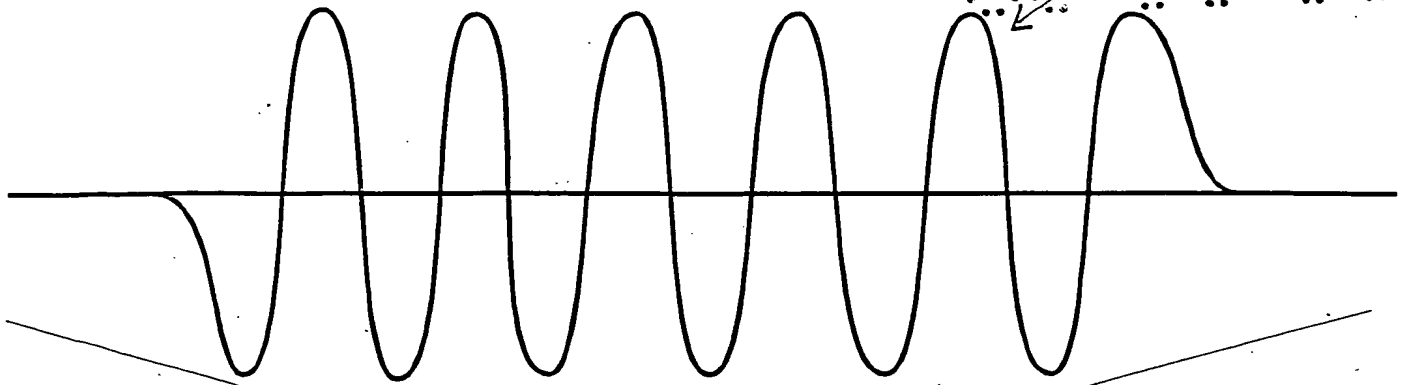


Fig. 8

8111

34 R-41619-1



High-Frequency Pulse Flow
(eg. 100 kHz, 10 %)

Pulsed Plasma Power
(e.g. 2000 Hz, 80 %)

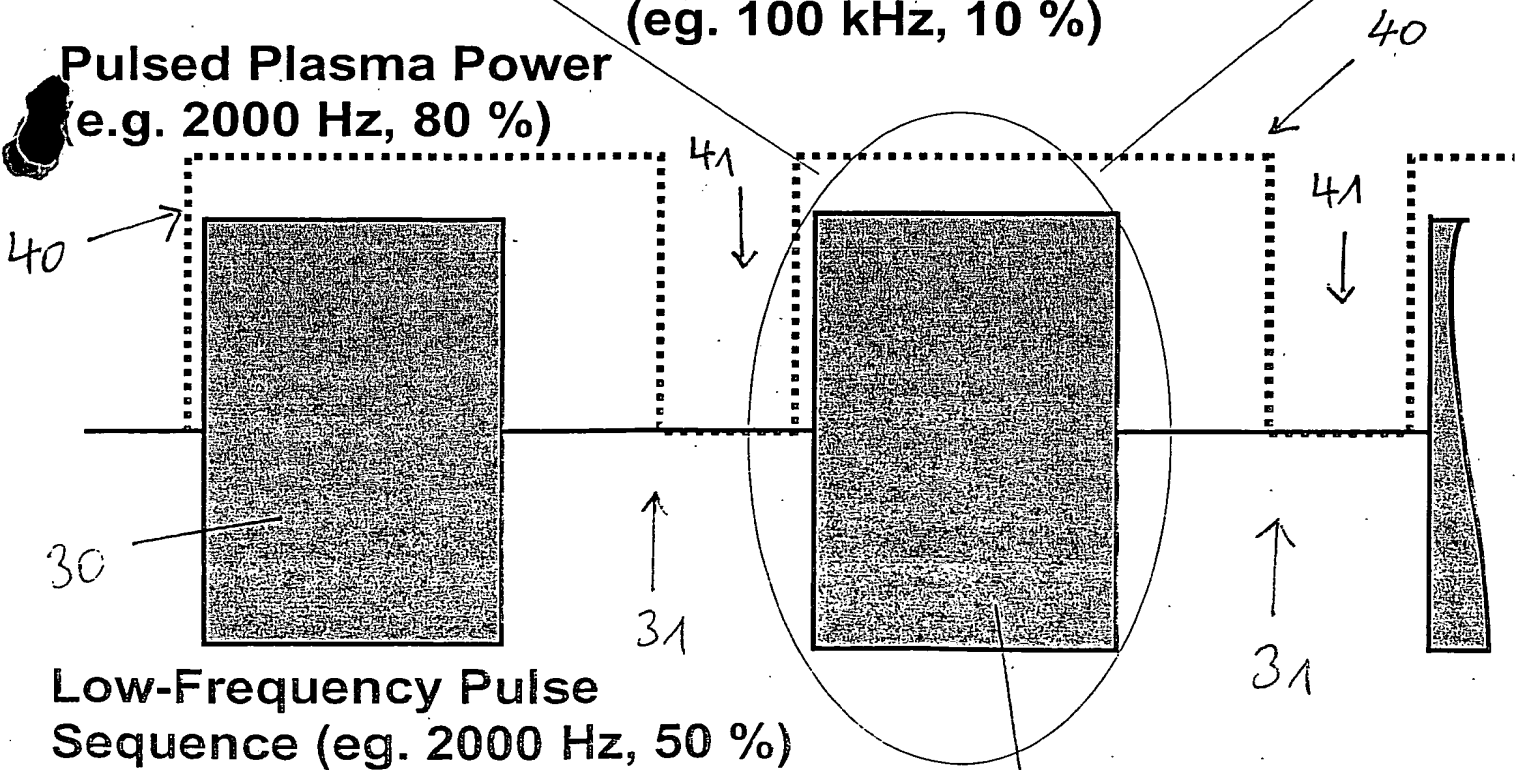


Fig. 9

9111

05. R: 41619-1

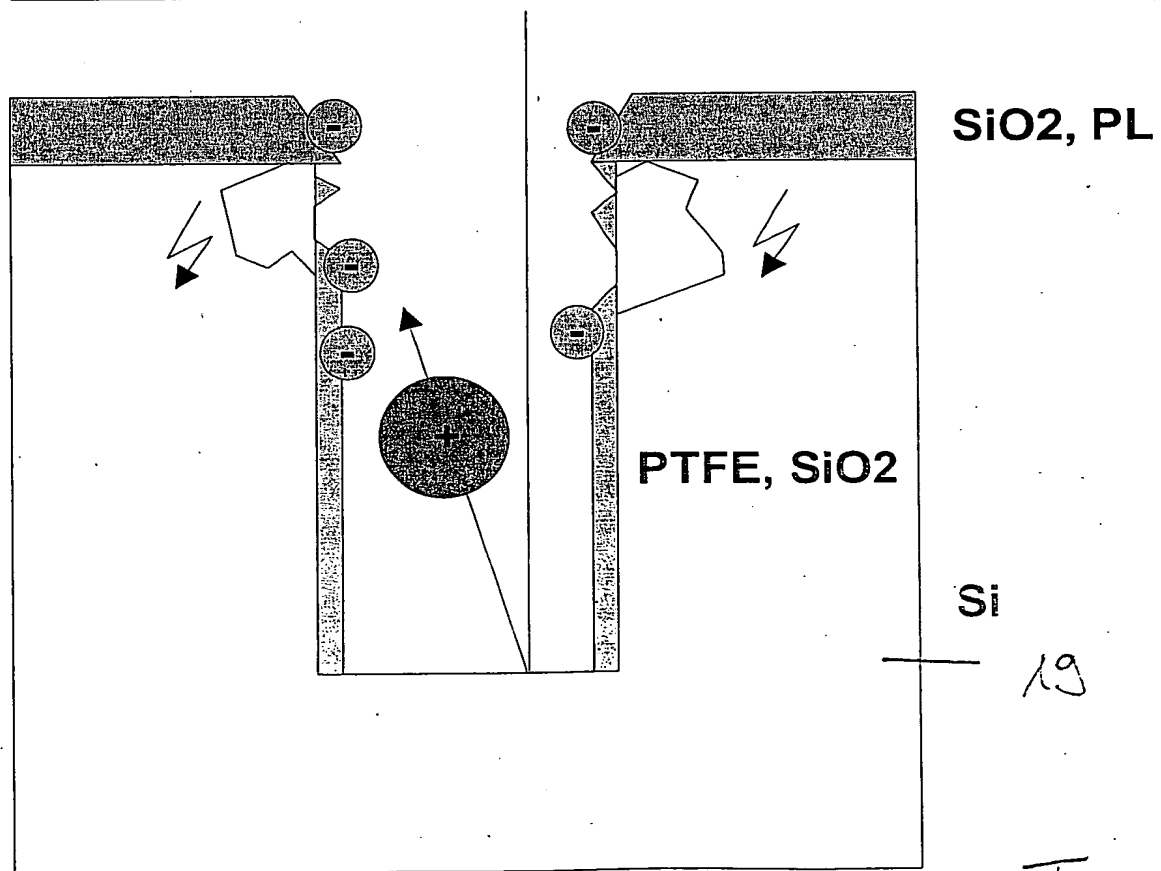
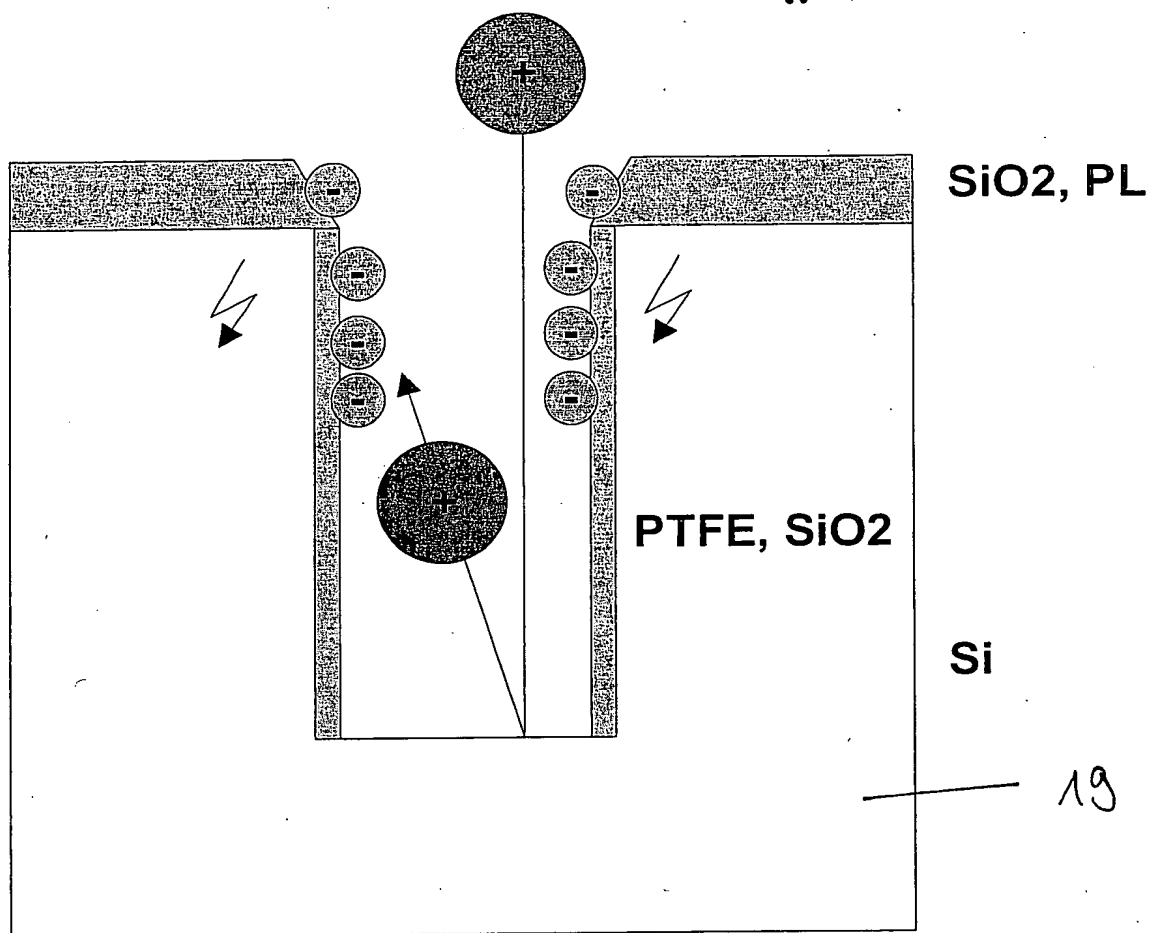


Fig. 10

10111

08.02.41619-1⁷⁶

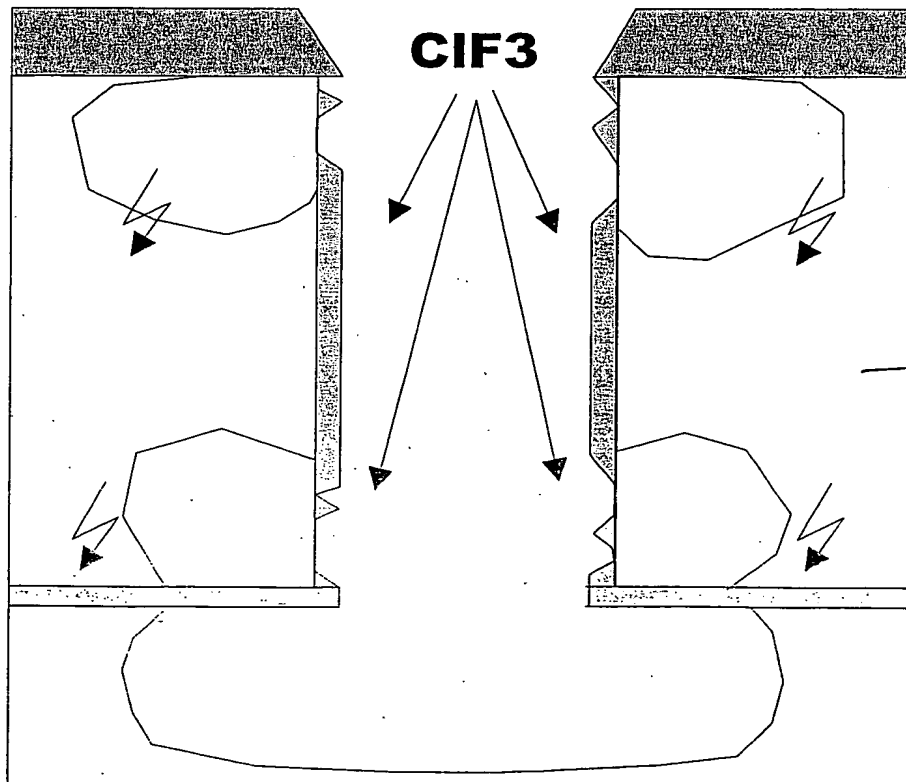
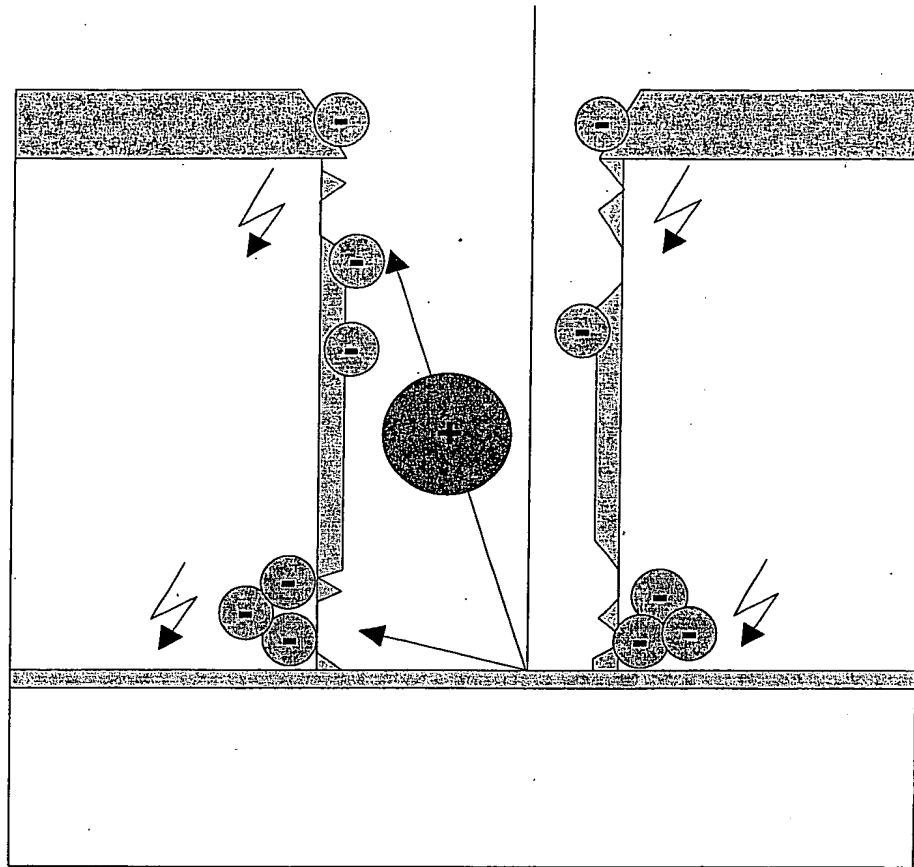


Fig. 11

11111

05.05.2016 19:13 37

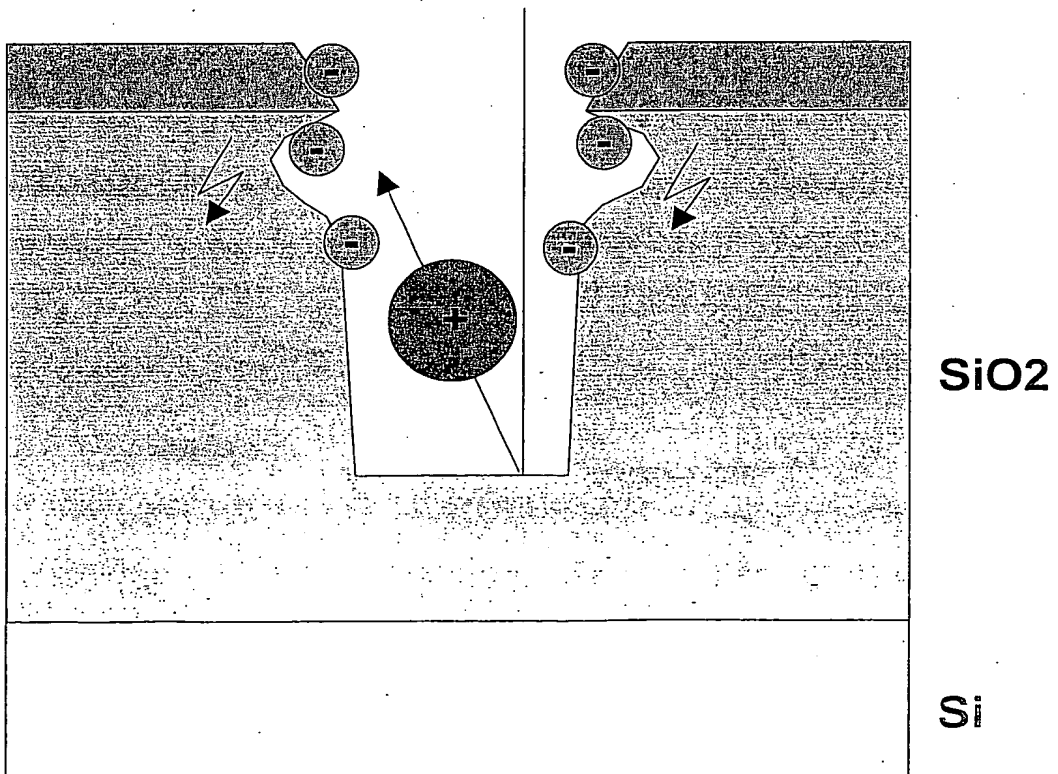
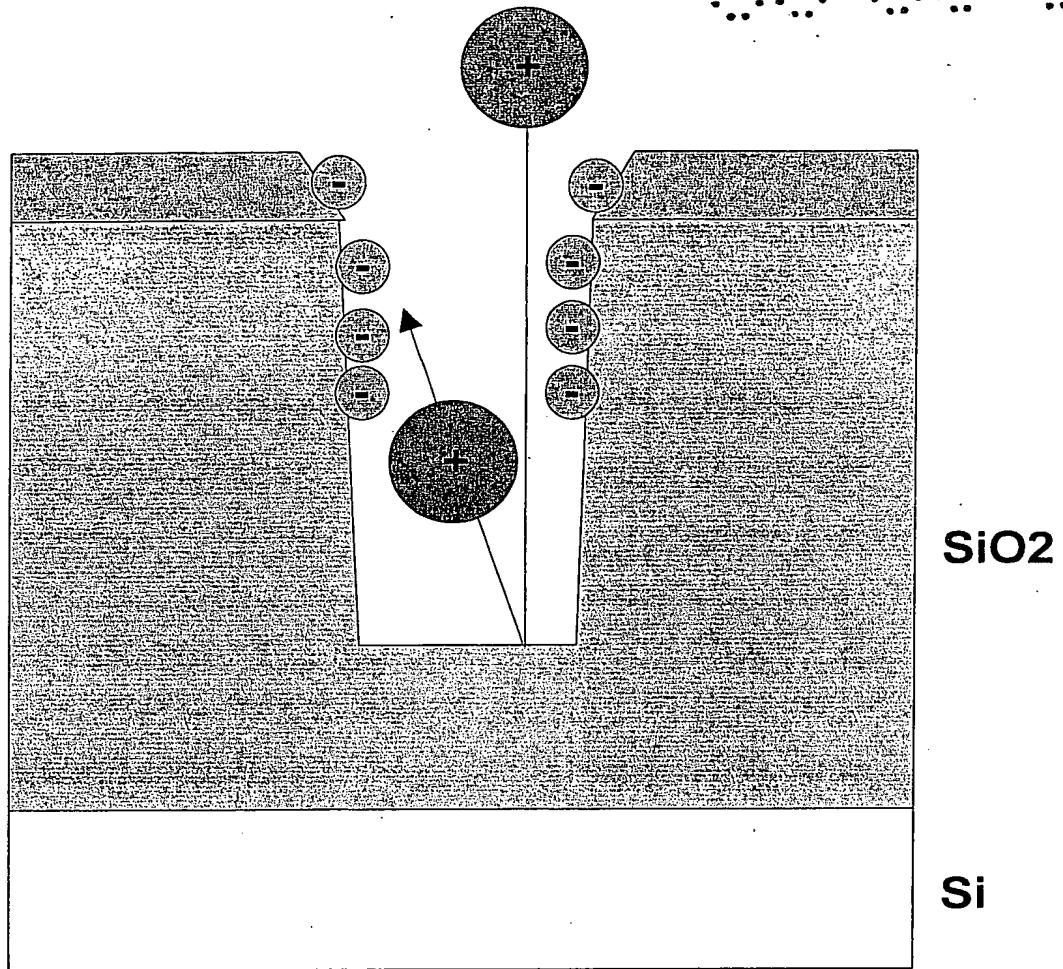


Fig. 12